



Utilisation du *Pinus uncinata* Mill. comme bio indicateur du climat passé dans le massif du Vercors

Clémentine Comte

► To cite this version:

Clémentine Comte. Utilisation du *Pinus uncinata* Mill. comme bio indicateur du climat passé dans le massif du Vercors. Biodiversité et Ecologie. 2014. dumas-01110537

HAL Id: dumas-01110537

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01110537>

Submitted on 28 Jan 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Master 2 Professionnel « Sciences du territoire »

Mention « Systèmes Territoriaux, Aide à la Décision, Environnement » (STADE)

Utilisation du *Pinus uncinata* Mill. comme bio indicateur du climat passé dans le
massif du Vercors

Mémoire soutenu le 01 Septembre 2014

par **Clémentine COMTE**

Devant un jury constitué de :

Directeur de mémoire : M. Jérôme Lopez-Saez (Post-Doc, Irstea, Grenoble – Ecosystèmes Montagnards)

Examineurs : M. Franck Giazzi (Enseignant-Chercheur, Maître de conférences, IGA, UJF – Pacte, Grenoble)

Organisme d'accueil : Irstea (Institut de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture)



RESUME

La reconstruction d'un paramètre climatique est développée par l'approche du *Pinus uncinata* Mill. comme bio indicateur du climat. La chronologie de référence créée à partir d'un échantillonnage d'environ 300 individus sur le massif du Vercors, s'étend sur une période de 1775 à 2013. La comparaison de cette chronologie de largeur de cernes avec les données météorologiques permet de déterminer les paramètres qui conditionnent la croissance du pin à crochets. Cette espèce est particulièrement réceptive aux précipitations de juin et juillet depuis les années 1920 à 1970. Avec les paramètres pluviométriques des données HISTALP, cette période est donc prise pour la calibration et la vérification de la reconstruction. Elle modélise les écarts à la moyenne des précipitations de juin à juillet. L'analyse des indices de croissance faibles et forts comparés aux années pluvieuses et de sécheresses permet de mettre en avant les limites d'une telle reconstruction. Ces années caractéristiques sont ensuite comparées avec les données instrumentales de Villard-de-Lans et d'Autrans pour valider la reconstruction. Il est principalement constaté que le facteur limitant du pin à crochets évolue dans le temps et que la reconstruction a plus de facilité à reconstruire les déficits en eau que les excédents. Enfin, la chronologie de largeurs de cernes issue des mesures de plus de 30 000 cernes de croissance constitue la première référence disponible dans le massif du Vercors.

Mots clefs : Dendroclimatologie – Paléoclimat – Paléoenvironnement – Préalpes – Changement climatique

ABSTRACT

The reconstruction of parameter climate is developed with *Pinus uncinata* Mill. as climate bio indicator. The tree-ring chronology is created with 300 samples in the Vercors massif for the period of 1775 – 2013. The comparison of this tree-ring chronology with meteorology data let of determines parameter condition growth of *Pinus uncinata* Mill. This species is mainly sensitive to precipitations of Jun and July for the period 1920 – 1970. With pluviometry parameter of HISTALP data, this period is used for the reconstruction calibration and reconstruction verification. This reconstruction models the mean deviation precipitations of Jun and July. Analysis of low and high growth indices, compared to dry years and wet years, permit to highlight the limitations of such reconstruction. Characteristics years are compared to instrumental data from Villard-de-Lans and Autrans to validate the reconstruction. It's mainly found that the limiting factor of *Pinus uncinata* Mill. growth evolves in time. The reconstruction model is better for dry years than wet years. Finally, the chronology constituted of 30 000 tree-rings is the first reference in the Vercors massif.

Key words: Dendroclimatology – Paleoclimate – Paleoenvironment – Prealps – Climate Change

Remerciements

Je tiens à remercier dans un premier temps, la direction de l'IRSTEA, notamment Monsieur François Véron (Responsable de l'unité de recherche Ecosystèmes montagnards) et Monsieur Frédéric Berger (Ingénieur de Recherches) responsables du projet CERNES.

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur Jérôme Lopez-Saez (IRSTEA) et Monsieur Christophe Corona (CNRS), maîtres de stage, pour leur patience, leur aide, leur partage de savoirs et d'expériences en dendrochronologie et dendroclimatologie.

Un merci également à Monsieur Franck Giazzi qui a accepté d'être mon tuteur de stage faisant parti du jury en espérant que cette soutenance le passionne.

Je tiens à remercier, Madame Geneviève Nouvellon (secrétaire) qui nous a aidée, suivie et rappelée à l'ordre dans nos démarches de gestion d'ordre de mission ainsi que pour sa bonne humeur quotidienne et Madame Catherine Lukie pour son assistance à la compréhension de la logistique d'un si gros établissement.

Je remercie également les membres du Parc Naturel Régional et de la Réserve du Vercors, Monsieur Pierre-Eymard Biron (Conservateur de la Réserve naturelle des Hauts-Plateaux du Vercors) et Monsieur Tournier Hervé (Garde animateur de la Réserve), pour les informations précises fournies lors de notre rencontre dans la maison du parc, Bruno et Monsieur Guy (Garde animateur de la réserve) pour leurs accompagnements sur le terrain et leur gentillesse.

Je souhaite aussi remercier l'équipe EM pour leur renfort lorsque nous avons rencontré des difficultés en SIG. Ainsi qu'Adrien et Tristan, compatriote en apprentissage de dendrogéomorphologie pour leur bienveillance et leur patience.

Je souhaite tout particulièrement à remercier, Sarah, mon binôme de choc (accompagnée de son fidèle compagnon Harley le chien) avec qui j'ai pu arpenter le massif du Vercors en long, en large et en travers. Et tous ces souvenirs inoubliables que nous avons créés comme : s'encorder dans un éboulis parce que c'est « vachement raide quand même », carotter dans la neige et se geler, mettre plus de temps à la descente qu'à la montée car la forêt est « trop grande »... et tous ces chants appris (et inventés...) après une dure journée de carottage. Ainsi que tous ces bons petits pique-niques que nous avons partagés.

Sans oublier, Thomas, stagiaire à l'IRSTEA, élève en master 2 STADE, mais surtout un ami avec qui débats, plaintes et fous rires sont possibles.

Merci à la promo STADE 2012-2014, pour ces deux années de bonheur avec qui j'ai pu partager des moments de stress, de rigolades, de coup de gueules et surtout de joie.

Enfin, merci à vous, ma famille, d'avoir cru en moi et de votre soutien.

Sommaire

LISTE DES ACRONYMES.....	4
INTRODUCTION	5
PARTIE 1 : ETAT DE L'ART.....	7
PARTIE 2 : LE PROJET CERNES.....	12
PREAMBULE DU PROJET.....	12
APPROCHE DENDROCHRONOLOGIQUE.....	24
APPROCHE DENDROCLIMATOLOGIE.....	29
PARTIE 3 LES RESULTATS ET LA DISCUSSION	34
RESULTATS	34
DISCUSSION.....	46
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	50
BIBLIOGRAPHIE.....	52
TABLES DES ILLUSTRATIONS.....	55
TABLES DES TABLEAUX.....	56
TABLES DES MATIERES	57
ANNEXES	59

Liste des acronymes

BCC : bootstrapped correlation coefficient

EMGR : Ecosystèmes Montagnards

GP : Grande Placette

HISTALP: Historical Instrumental Climatological Surface Time Series Of The Greater Alpine Region

IRSTEA : Institut de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture

PNRV : Parc Naturel Régional du Vercors

r ou R : coefficient de corrélation

r² ou R² : coefficient de détermination

RBI : Réserve Biologique Intégrée

RE : Réduction de l'erreur

RNHP : Réserve Naturelle des Hauts-Plateaux du Vercors

RR : Rain Rate : Mesure de précipitation

Introduction

A l'heure actuelle où le changement climatique est au cœur de toutes les préoccupations, l'évolution des climats à petites échelles est de plus en plus étudiée à travers l'analyse de proxys.

La paléoclimatologie a pour but de reconstituer les conditions climatiques ayant régné à la surface de la Terre dans le passé et à expliquer leur évolution. Les géologues ont reconstitué la succession des périodes glaciaires et interglaciaires en étudiant tout d'abord les dépôts continentaux puis les sédiments marins et les glaces polaires. Témoins d'une époque lointaine, ces indicateurs permettent de reconstruire les fluctuations du climat sur plusieurs centaines de milliers d'années mais n'ont pas une résolution suffisante pour permettre de comprendre les fluctuations des derniers millénaires et replacer l'évolution actuelle dans une perspective à long terme. Seuls les arbres permettent de pallier ces lacunes ! Dès l'antiquité, Théophraste, un philosophe grec disciple d'Aristote, avait remarqué que les anneaux concentriques, également appelé cernes de croissance, qui constituent le tronc des arbres avaient un caractère annuel. Compter les cernes permet donc de connaître l'âge de l'arbre. Mais c'est Léonard de Vinci qui le premier, au XV siècle, donne une explication à la variation d'épaisseur de ces anneaux. Dans son Traité de la peinture, il écrit ainsi « *Les anneaux dans les branches des arbres qui ont été coupées montrent le nombre de leurs années et quelles années ont été plus humides ou plus sèches selon que ces anneaux sont plus ou moins épais* ». Dans ce texte, le génie florentin énonçait sans le savoir, les principes d'une nouvelle science : la dendrochronologie. Plus de quatre siècles plus tard, les motivations du dendrochronologue n'ont pas changé : il cherche à décrypter les secrets des anneaux pour reconstruire le climat passé !

Ce projet est basé sur cette approche dendrochronologique. Sous la direction de Christophe Corona (Chargé de Recherche CNRS en dendrochronologie) et de Jérôme Lopez-Saez (Post-Doctorant en dendrogéomorphologie à l'IRSTEA), il est consacré aux pins à crochets (*Pinus Uncinata* Mill. Ex. Mirbel), pluricentennaires, patrimoniaux dans le massif du Vercors et sur l'utilisation de cette espèce en tant que **bio-indicateur du climat passé permettant une reconstruction des précipitations à l'échelle de ce massif**.

Dans ce massif préalpin calcaire, directement exposé aux dépressions océaniques, les précipitations sont abondantes (1200 mm par an à Villard de Lans) mais l'eau est rare. Le plateau, karstique, très fissuré, ne retient pas l'eau et la plupart des écoulements sont souterrains. Sur les hauts-plateaux calcaires, lapiazés, où le sol est très mince, les précipitations estivales vont conditionner la croissance de l'espèce. Mais l'altitude élevée, comprise entre 1800 et 2400 mètres, et la localisation des peuplements forestiers, à la limite occidentale de leur aire de répartition, constituent également des facteurs de stress qui rendent le signal dendrochronologique complexe. Et les simulations climatiques basées sur différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre qui prédisent un accroissement des sécheresses estivales ont conduit conjointement, le gestionnaire et le scientifique, à s'interroger sur le devenir de ces peuplements patrimoniaux.

Afin de répondre à cette problématique, quatre questions de recherche ont été soulevées. Il s'agira de:

- (i) valider le rôle limitant des précipitations dans la croissance des pins à crochets de la réserve des hauts plateaux du Vercors
- (ii) déterminer les facteurs climatiques qui expliquent la croissance des populations de *Pinus uncinata*
- (iii) modéliser les relations cernes-climat afin de
- (iv) reconstruire le climat les fluctuations du climat au cours des derniers siècles

Ce mémoire s'articule en quatre points, dans un premier temps nous aborderons succinctement l'historique de la dendrochronologie et nous nous attacherons à définir l'approche dendroclimatologique utilisée dans cette étude. Dans un second temps, nous présenterons les sites de l'étude ainsi que les stratégies d'échantillonnage utilisées en ce qui concerne le choix des placettes ayant fait l'objet de prélèvements mais également les données météorologiques utilisées. Nous présenterons ensuite la méthodologie utilisée pour réaliser l'étude dendroclimatologique. Enfin, la dernière partie de ce travail sera consacrée à la présentation, à l'analyse et à la discussion des résultats obtenus.

PARTIE 1 : Etat de l'art

I. La dendrochronologie

La dendrochronologie est une **méthode de datation** absolue basée sur l'analyse des cernes de croissance des arbres (Fritts, 1976). Dans les régions à climat saisonnier contrasté, les espèces ligneuses pérennes génèrent un cerne de croissance annuel influencé par les variations climatiques interannuelles. Chez les conifères, le cerne de croissance (Figure 1) présente une structure particulière qui se caractérise par:

- Un **bois initial** de couleur claire à faible densité qui se forme au printemps jusqu'au début de l'été afin de transporter l'eau et les nutriments,
- Un **bois final** de couleur foncé et à densité plus élevée qui se forme lors de l'été. Cette structure favorise la stabilité mécanique de l'arbre.

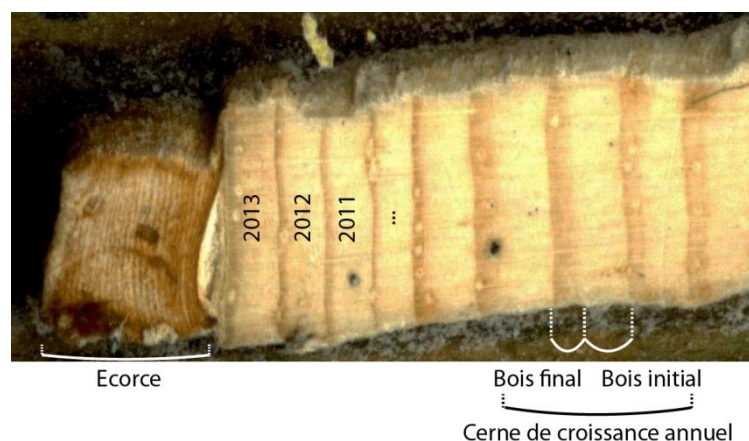


Figure 1 Cerne de croissance du *Pinus uncinata* Mill.

a. Le signal dendrochronologique : un signal complexe

Les cernes de croissance enregistrent les informations de son milieu (Fritts, 1976). Ainsi, une série de largeurs de cerne est une agrégation linéaire de plusieurs facteurs pouvant être exprimée selon l'équation suivante (Box & Jenkins, 1970 ; Graybill, 1982 ; Cook, 1990 ; Petitcolas, 1998 ; Corona, 2007) :

$$Rt = At + Ct + \delta D1t + \delta D2t + Et$$

Avec,

Rt = Série de largeurs de cernes observées

At = Tendence d'âge

Ct = Signal climatique

$\delta D1t$ = Impulsion liée à une perturbation exogène du peuplement (mouvement de terrain, inondation,...)

$\delta D2t$ = Impulsion liée à une perturbation endogène locale (compétition, concurrence,...)

Et = Pars non expliquée des variations interannuelles, non liées aux signaux

L'épaisseur d'un cerne varie chaque année en fonction de **facteurs intrinsèques** (spécifiques à l'espèce végétale) et **extrinsèques** (spécifiques à son milieu). Les facteurs intrinsèques représentent le taux de croissance propre à l'espèce végétale, c'est dans son modèle génétique. Les facteurs extrinsèques considèrent l'influence que peut avoir l'environnement du végétal sur lui-même. Le climat, la géologie, l'exposition, la pédologie, la compétition inter/intra espèces jouent un rôle prépondérant lors de la mise en place du cerne de croissance.

Ces facteurs **exogènes et endogènes** peuvent, lorsqu'ils sont trop contraignants (ou au contraire très favorables), constituer des **facteurs de stress pour l'arbre**. Dans ce cas, la croissance radiale est modifiée, l'arbre forme des **cernes caractéristiques**. Ces cernes peuvent être identifiés par leur largeur très faible (ou au contraire très importante) par rapport aux cernes encadrants. Un cerne très large témoigne ainsi d'un environnement favorable à la croissance. Un cerne étroit est observé lorsque les conditions de croissance sont stressantes pour l'individu. Les cernes caractéristiques constituent des repères chronologiques utilisés pour synchroniser des séries de cernes individuelles (à l'échelle d'un arbre) et construire des **chronologies moyennes de séries contemporaines** (à l'échelle d'un ou plusieurs peuplements forestiers) dans lesquelles les particularités propres aux individus sont atténuées (Schweingruber et al, 1990).

b. Un peu d'histoire

La dendrochronologie trouve **ses origines dans les observations de Théophraste** (-322 av JC), botaniste, naturaliste, polygraphe et alchimiste, disciple d'Aristote, qui avait remarqué que les arbres formaient un cerne de croissance chaque année. Près d'un millénaire plus tard, Leonard De Vinci donne une explication à la variation d'épaisseur des cernes de croissance. Mais c'est à la fin 19ème siècle que l'astronome américain A.E Douglass, qui travaillait sur la manière dont les taches solaires pouvaient influencer la croissance des arbres, pose les bases de la discipline. Son hypothèse concernant l'impact de l'activité solaire sur la croissance n'a pas été démontrée. En revanche, lors d'étude de bois dans un ancien village indien, il découvrit cependant que des échantillons provenant de différents édifices présentaient des patrons de croissance similaires. Il fut ainsi capable de synchroniser des échantillons de bois et jeta les bases de l'interdatation, principe fondateur de la dendrochronologie. Cette discipline commença ensuite à s'étendre aux Etats-Unis dans les régions semi-arides et désertiques. En Europe, les premières études dendrochronologiques apparaissent dans **les années 1950 sous l'impulsion de l'école allemande**.

Aujourd'hui, nous retrouvons plusieurs disciplines résultant d'une hybridation entre deux domaines :

Domaine	Discipline	Applications
Ecologie	Dendroécologie	Historique des feux, dépérissement des forêts, dynamique et croissance...
Climatologie	Dendroclimatologie	Périodes de froid et de sécheresse, reconstruction du climat passé, analyse du climat présent...
Géologie	Dendrogéomorphologie	reconstitutions des processus géomorphologiques
Anthropologie	Dendroarchéologie Dendroglaciologie	Datation des constructions anciennes, arbres fossiles, monuments historiques...

Tableau 1 Les différentes disciplines issues de la dendrochronologie (d'après Lebourgeois et Mérian, 2012)

II. La dendroclimatologie

Dans le cadre de notre travail sur les pins à crochets du Vercors une approche dendroclimatologique sera privilégiée. Cette approche utilise les informations contenues dans les cernes de croissance de l'arbre afin de reconstruire des paramètres climatiques simples (précipitations, températures) ou synthétiques (évapotranspiration potentielle, bilan hydrique) avec une résolution annuelle, sur plusieurs siècles (voir par exemple Büntgen et al., 2006 ; Corona et al., 2010).

La croissance radiale d'un arbre est influencée par les conditions climatiques de l'année n (Fritts, 1976 ; Becker, 1989 ; Hunt et al., 1991 ; Kienast et al., 1987 ; Biondi, 1993 ; Desplanque, 1997 ; Petitcolas, 1998 ; Corona, 2007). Cependant, pour certaines espèces les conditions des années antérieures (jusqu'à $n-6$) peuvent influencer la croissance radiale de l'année n (Becker, 1989 ; Bert, 1992). Par exemple, le pin à crochets (*Pinus uncinata* Mill.) forme son cerne de croissance en fonction des conditions climatiques des années n et $n-1$ (Petitcolas, 1998).

a. Les principes fondamentaux de la dendroclimatologie

Pour pouvoir accorder une valeur générale aux résultats obtenus, cette discipline se fonde sur deux principes majeurs : le principe d'uniformité et le principe du facteur limitant (Fritts, 1976).

- Le principe d'uniformité concerne les processus physiques et biologiques qui régissent la croissance du végétal. Il est considéré qu'un même facteur (eau, sol, température, etc...) agit de la même sorte dans l'espace et le temps sur l'individu (Mérian, 2010).
- Le principe du facteur limitant considère qu'un végétal ne peut pas croître plus rapidement que ne l'autorise un facteur physique le plus limitant. Ce facteur limitant peut être, selon les endroits, les précipitations (stress hydrique) ou la température (stress thermique). La durée de ce stress est variable tout comme son intensité ce qui se traduit par des variations interannuelles de la largeur des cernes.

En milieu boréal, le facteur limitant est ainsi la température, et la largeur des cernes est quasi proportionnelle à la température moyenne durant la période végétative. En zone méditerranéenne, ce sont les précipitations qui régissent la croissance et un déficit hydrique estival marqué est systématiquement à l'origine d'un cerne caractéristique étroit. En contexte tempéré, ces deux facteurs physiques influencent la croissance du cerne (Figure 2).

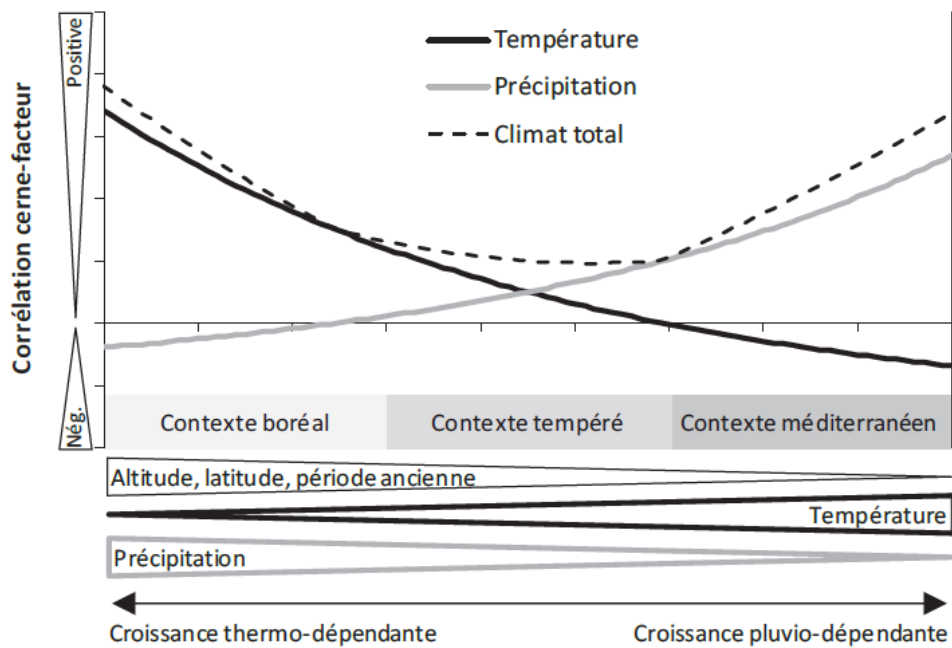


Figure 2 Substitution de contraintes climatiques sur la croissance radiale le long d'un double gradient de baisse des températures et de hausse des précipitations (gradient latitudinal ou altitudinal) (Mérian, 2012)

Le signal dendrochronologique intègre divers signaux environnementaux et biologiques et peut être décomposé selon différentes gammes de fréquence. (Lebourgeois et Mérian, 2012)

- le signal de basse fréquence (échelle multi décennale) est principalement lié à la tendance d'âge de l'arbre et aux variations lentes des conditions environnementales (changement climatique séculaire).
- le signal de moyenne fréquence (échelle décennale) peut être lié à des variations climatiques cycliques (oscillation nord Atlantiques, ENSO). Il est parfois attribuable à des interventions sylvicoles (coupes ou chablis, par exemple).
- le signal de haute fréquence (échelle interannuelle) est principalement lié aux variations interannuelles du climat ou à certaines attaques de pathogènes (cycles de la tordeuse grise du mélèze, par exemple)

b. La dendroclimatologie en Europe

Nous retrouvons dans le monde entier des études en dendroclimatologie. Certaines portent essentiellement sur la reconstruction des températures et d'autres sur les précipitations passées. Ces études sont situées dans [les milieux semi-arides](#), [en zone boréale](#), [ou en limite supraforestière dans les zones de montagne](#). En effet, au niveau de ces écotones, les stress hydriques ou thermiques importants favorisent la réponse des arbres au climat.

Dans l'arc Alpin, les reconstructions dendroclimatologiques se situent principalement en Suisse, en Italie, en Autriche et dans la partie orientale des Alpes Française (Tableau 2). Dans notre cas, nous nous intéressons particulièrement aux études menées sur *Pinus uncinata* Mill. A ce jour, la plupart des études dendrochronologiques consacrées au pin à crochets à l'exception de celles de Rolland sur dalles karstifiées (1995,1996), ont été réalisées dans les Alpes externes (Edouard et al., 1991) et internes. Cependant, dans les Préalpes françaises, aucune chronologie n'a été utilisée dans une perspective de reconstruction du climat passé.

Auteurs	Localisation	Latitude	Longitude	Altitude	Nombre d'arbre	Chronologie	Paramètres de reconstruction	données météo utilisées	Période	Essence
Corona et al., (2010)	Alpes françaises	44°-45°30'	6°30'-7°45'	1600-2300	548	34	Température	Température mensuelles homogénéisées HISTALP	749-2008	Larix decidua Mill.
Corona et al., (2010)	Alpes Européenne	44°05' - 47°41'	6°43' - 13°	1725-2350	965	38	Température estivale	HISTALP	1000-2000	Pinus cembra. L / Larix decidua Mill
Petitcolas (1998)	Belledonne / Moyenne et Haute Tarentaise / briançonnais	/	/	1750-2066	/	34 populations	Température	Relation cerne/climat	/	Pinus cembra. L / Larix decidua Mill / Picea abies L. / Pinus uncinata Mill
M.Morellon et al., (2012)	Pyrénées Sud	42°38'	1°60'	2200-2350	/	/	Température Juin à Septembre	Données instrumentales du Pic de Bigorre	1260-2005	Pinus uncinata Mill
M.Morellon et al., (2012)	Pyrénées Sud	42°41'	0°06'	2300-2400	/ 51	/ 4	Température Juin à Septembre	Données instrumentales du Pic de Bigorre HISTALP	1260-2005	Pinus uncinata Mill Larix decidua Mill.
A.Coppola et al., (2013)	Alpes Italiennes	45°54' - 46°19'	10°21' - 10°53'	1910-2160			Température moyenne estivale			
Saulnier et al., (2010)	Alpes françaises	4°06'-45°53'	5°90' - 7°45'	1935-2350 m	652	42	Validation du pin cembro comme paléoclimatique	Archives historiques et HISTALP		Pinus cembra L.

Tableau 2 Principales reconstructions dendroclimatologiques récentes dans les Alpes Européennes et les Pyrénées

PARTIE 2 : Le projet CERNES

PREAMBULE DU PROJET

Le diagramme ci –dessous (Figure 3) matérialise les étapes et l'organisation du projet selon différents axes de travail.

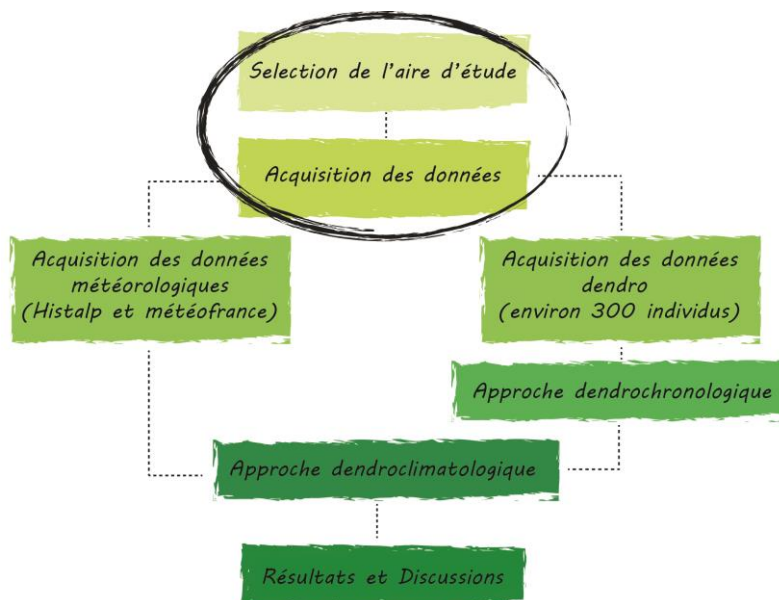


Figure 3 La démarche méthodologique développée dans ce mémoire

Le projet CERNES (Caractérisation dEndrochronologique des forêts de pins à crochets de la Réserve Naturelle des Hauts-Plateaux du vErcorS) est subventionné par le Conseil Général de l'Isère. Les partenaires scientifiques collaborant au projet sont : l'IRSTEA (unité Ecosystèmes Montagnards), le laboratoire CNRS GEOLAB (UMR CNRS6042) localisé à Clermont-Ferrand et la réserve des Hauts Plateaux du Vercors. Le Parc Naturel Régional (PNR) du Vercors qui recouvre l'intégralité du massif s'intéresse tout particulièrement à cette forêt de pin à crochets. Elle représente un intérêt patrimonial en raison de son exploitation pour les fours à Poix jusque dans les années 1950 et parce qu'il s'agit de la plus grande pinède de pins à crochets des Alpes occidentales. Des connaissances précises sur l'histoire et l'écologie de la forêt permettent d'appréhender son fonctionnement et de prévoir sa gestion à long terme.

Le projet CERNES repose sur trois objectifs :

- La datation des vieux peuplements de pin à crochets de la réserve naturelle des Hauts Plateaux du Vercors à partir d'une approche dendrochronologique,
- La détermination des facteurs climatiques qui influencent la croissance radiale de cette espèce à partir d'une approche dendroécologique,
- La reconstruction d'un ou des paramètres climatiques simples (précipitation et température) à l'échelle du massif du Vercors à partir d'une approche dendroclimatologique. Ce dernier objectif fait l'objet de ce mémoire.

Ce dernier objectif fait l'objet de ce mémoire. Afin d'affiner les relations entre la croissance radiale du pin à crochets et le climat passé, plus de 300 arbres ont fait l'objet de prélèvements et d'analyses dendrochronologiques. La chronologie de largeurs de cernes issue des mesures de plus de 30 000 cernes de croissance constitue [la première référence dendrochronologique disponible dans les Préalpes Françaises](#). Elle met en évidence le rôle favorable des précipitations printanières et estivales sur la croissance des pins vertacoriens. Cet archive climatique permet ainsi de reconstituer les fluctuations du climat depuis la fin du Petit Age Glaciaire.

I. Le contexte géographique de l'étude

Localisation géographique du massif du Vercors

Le massif du Vercors (5°27'4,465"E 44°56'50,019"N) se situe dans les Préalpes nord-ouest des Alpes Françaises (Figure 4). Il est découpé par deux départements qui sont l'Isère et la Drome de la région Rhône-Alpes. En plus d'être composé de 86 communes, le massif est divisé en plusieurs régions (les Coulmes, les Quatre Montagnes, le Vercors drômois, les Hauts-Plateaux du Vercors, le Royans, la Gervanne, le Diois et le Trièves).

Le Vercors fait partie des trois massifs qui encadrent l'agglomération grenobloise. Le massif du Vercors a obtenu le statut de [Parc Naturel Régional \(PNRV\)](#) depuis le 16 octobre 1970. En 2009, le PNRV couvre 206 208 hectares dont 139 000 hectares de forêts. Sa création a pour objectif de contribuer à des actions de protection de la nature et de mise en valeur des sites et monuments historiques. [La Réserve Naturelle des Hauts-Plateaux du Vercors](#) entièrement inscrite dans le PNRV a été créée le 27 février 1985. Elle inclut depuis le 16 octobre 2009 une [Réserve Biologique Intégrale \(RBI\)](#). La Réserve Naturelle reste un espace réglementaire ayant pour but de conserver un aspect « naturel » à ce milieu. Par une diversité d'habitats forestiers et d'espèces végétales et animales, la RBI est un laboratoire à ciel ouvert. L'ONF et le PNRV se chargent de veiller aux développements et aux suivis des expériences laissées aux services de la nature.

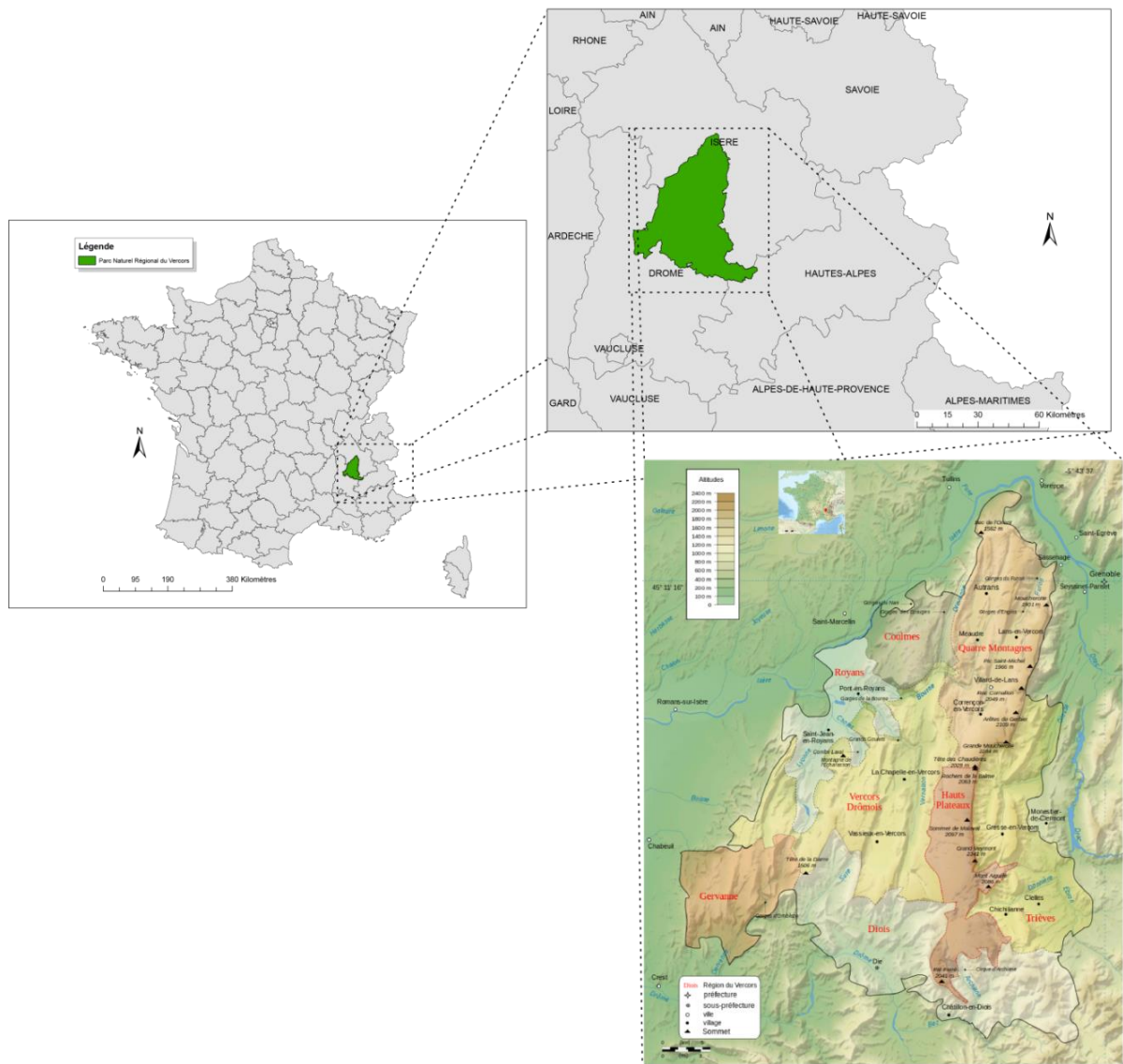


Figure 4 Localisation géographique du massif du Vercors

Des influences climatiques diverses

Le massif du Vercors se trouve au cœur d'influence climatique divers. Il est conditionné par les airs maritimes provenant de la Méditerranée (Sud-Est) et de l'Océan Atlantique (Nord-Ouest et Sud-Est) (Figure 6). Le climat est de type montagnard de par son altitude relativement élevée.

Ce type de climat est caractérisé par des précipitations cumulées élevées et une température moyenne inférieure à 9,4°C. On dénombre 25 jours où la température minimale est inférieure à -5°C et moins de 4 jours avec un maximum supérieur à 30°C (Joly, 2010). De manière plus locale, le massif du Vercors possède une pluviométrie annuelle qui varie de 1200 mm à 1800 mm en fonction de la localisation géographique (Rousset, 1982; Delannoy, 1991). La température moyenne annuelle est inférieure à 5°C avec un enneigement d'une durée de 6 à 7 mois. Cependant, il n'existe pas de données météorologiques longues (+ de 60 ans) localisées à l'échelle du massif.

Les données météorologiques les plus longues se situent à proximité des plus grandes villes telles que Lyon-Bron, Grenoble et la station de Montélimar. Les stations Météo-France localisées dans le massif, mais présentent des séries météorologiques courtes inférieurs à 50 ans (Autrans, Bouvante, Chichilianne, Die, Villard de Lans, Gresse-en-Vercors, Lus la Croix-Haute et Saint-Romans (Figure 5)).

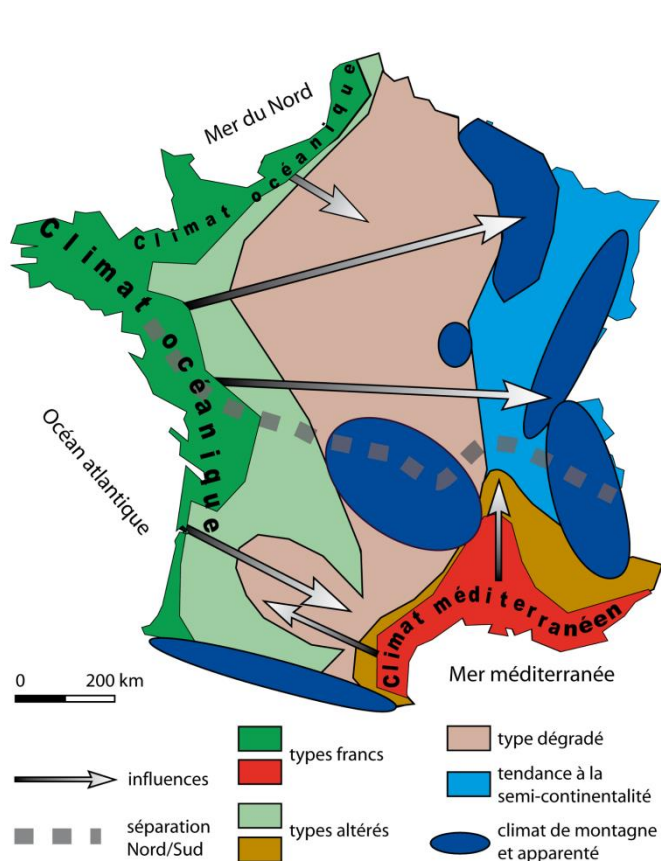


Figure 6 Schéma synthétique de l'espace des climats (Joly et al., 2010)

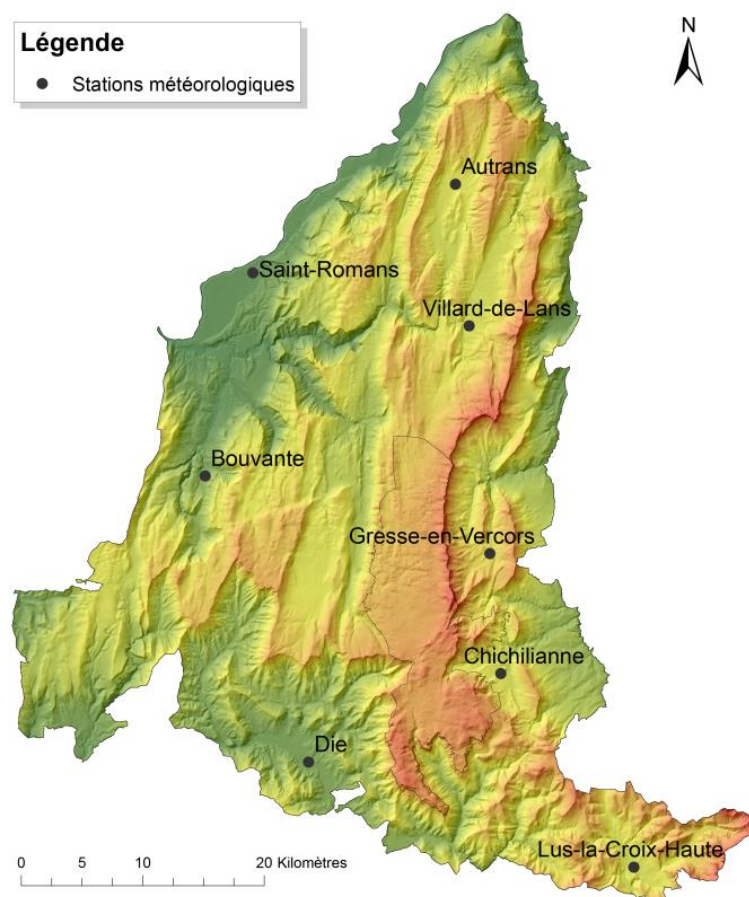


Figure 5 Localisation géographique des stations météorologiques présentes sur le massif du Vercors

Un contexte géologique spécifique

La formation du massif du Vercors s'est déroulée en trois grandes phases :

- De -150 à -65 millions d'années : Pendant la distension du Lias-Dogger, création d'un bassin par l'étirement de la plaque continentale européenne suivi de la formation de la **roche sédimentaire par occupation d'une mer dans laquelle se forme des calcaires et des marnes**. Il en résulte un empilement de plusieurs centaines de mètres d'épaisseur de ces roches dont l'âge va du Lias jusqu'au Miocène.
- **Collision des deux plaques tectoniques** qui s'étaient dans un premier temps écartées entraînant la **formation des différents massifs**. Les roches constitutives du Vercors se sont déplacées vers l'ouest créant sa structure ondulée actuelle conséquence des mouvements tectoniques. Entre -22 et -5 millions d'années, le nord-ouest du Vercors est encore occupé par les eaux. A la fin de cette période, des soulèvements importants (engendrant la formation des Alpes actuelle) font reculer la mer.
- A l'ère tertiaire : le massif du Vercors est **soumis à l'érosion de l'action de l'eau et de la glace pendant les périodes de glaciations du Quaternaire**. Ainsi, par l'influence de phénomènes physiques, ce relief offre une multitude de paysages et de structures géologiques (Annexe 2). Ces dernières peuvent se retrouver sous forme de **lapiaz** (roche calcaire apparente sculptée par le ruissèlement des précipitations (Figure 7)) sous forme de **dolines** (des dépressions plus ou moins circulaires dans le sol) ou encore sous forme de failles verticales appelées **scialets**. L'altitude du massif du Vercors varie de 800 à 2 341 mètres avec comme plus haut sommet le Grand Veymont.



*Figure 7 Formation géologique de type lapiaz avec la présence de *Pinus uncinata* Mill.*

Une biodiversité importante

La géologie et la géomorphologie du massif ainsi que la variété des microclimats (liée à l'exposition, à la latitude et à l'altitude) sont favorables à la **biodiversité spécifique et écosystémique**. On retrouve dans le Vercors l'étagement altitudinal classique observé en montagne avec la juxtaposition d'étage montagnard (700 à 1500 mètres), subalpin (1300 à 2200 mètres) et alpin (2000 à 3000 mètres). Néanmoins la géomorphologie karstique induit une perméabilité importante et sont à l'origine d'une aridité d'origine édaphique. La végétation est, de ce fait, **soumise à des stress hydriques estivaux réguliers**.

L'étage montagnard est largement colonisé par une forêt de type Hêtraie-sapinière en versant ubac et de pin sylvestre en versant adret. Dans la partie septentrionale du massif, l'écotone montagnard-subalpin est caractérisé par une pessière dominante souvent entrecoupée par des clairières. Dans la partie sud du massif du Vercors cette transition n'est pas visible. Cet étagement s'explique par l'influence méditerranéenne du climat. A 1600 mètres, dans l'étage subalpin, le pin à crochets (*Pinus uncinata*) et l'épicéa (*Picea abies*) cohabitent, laissant place peu à peu en altitude au pin à crochets (*Pinus uncinata*). La strate arbustive dense est essentiellement composée de Genévrier nain (*Juniperus sibirica*), Raisin d'ours commun (*Arctostaphylos uva-ursi*), Myrtilles (*Vaccinium myrtillus*), Rhododendron ferrugineux (*Rhododendron ferrugineum*) ou d'Airelles bleues (*Vaccinium uliginosum*). A l'étage alpin (+2 100 m à 2 341 m), les habitats dominants sont de types « steppiques » avec la présence de pelouses rases sur lapiaz.

II. Acquisition des données

a. Le pin à crochets

Fiche d'identité du pin à crochets (*Pinus uncinata* Mill.) (Tableau 3)

Nom commun	Pin à crochet	Nom latin	<i>Pinus uncinata</i>	Famille	Pinaceae
Catégorie	Arbre monoïque				
Port	Arbre de 2 ^{ème} grandeur qui se déforme au fur et à mesure de son déplacement vers l'Est (Alpes). Ecorce grisâtre.				
Feuillage	Persistant, aiguilles mi-longue de 4 à 8 cm réunies en faisceaux de deux				
Floraison	Chatons mâles blancs-jaunâtres, longs de 10-15 mm				
Couleur	Vert sombre				
Fruits	Cônes caractérisés par la présence plus ou moins visible d'un "crochet"				
Croissance	Lente				
Hauteurs	jusqu'à 20 mètres				
Sol	Il accepte des substrats divers (calcaires, gypse, schiste)				
Emplacement	On le trouve dans les massifs d'Europe centrale et orientale : Alpes, Sudètes, Balkans, Carpates, jusqu'au Caucase. Il est souvent présent dans la zone de combat avec le pin sylvestre et l'épicéa (1 500 à 2 700 mètres), pour finir en peuplement pur en altitude. Il apprécie particulièrement les expositions Ouest.				



Tableau 3 Fiche d'identité de l'espèce choisie pour l'étude (le *Pinus uncinata* Mill.)

Un axe nord-sud

Le massif du Vercors est soumis à des influences méditerranéennes dans sa partie méridionale est caractérisé par un climat à tendance océanique dans sa partie septentrionale. Pour cette raison, nous avons choisi d'échantillonner des populations de pin à crochets selon un axe Nord/Sud. L'objectif ici de **déterminer l'impact de la variabilité climatique sur la croissance radiale du pin à crochets.**

Une formation géologique remarquable

Dans ce massif préalpin calcaire, directement exposé aux dépressions océaniques, les précipitations sont abondantes (1200 mm par an à Villard de Lans) mais l'eau superficielle est rare. Le plateau, karstique, très fissuré, ne retient pas l'eau et la plupart des écoulements sont souterrains. Sur les hauts-plateaux calcaires, lapiazés où le sol est très mince, les précipitations sont susceptibles de conditionner fortement la croissance du pin à crochets. **Une réponse des individus au stress hydrique estival est très probable.** Afin d'optimiser cette réponse, l'échantillonnage été centré sur ce biotope contraignant.

Des prélèvements réalisés au niveau de la limite supra forestière

Les travaux récents montrent que les arbres les plus sensibles aux variations du climat sont localisés dans les zones **à bordures des écosystèmes et en limite de leur aire de répartition** (Guisan et al., 1995). Cette situation géographique particulière rend en théorie, particulièrement sensibles aux fluctuations du climat.

Dans le massif du Vercors, à une altitude de 1 600 mètres, les peuplements forestiers sont constitués de pin à crochets et d'épicéa. Au-dessus de cette limite, les épicéas laissent place à la pinède de *Pinus uncinata*. Afin de limiter les perturbations liées à la concurrence interspécifique l'échantillonnage a été fixé réalisé systématiquement au-dessus **1 700 mètres d'altitude.**



Figure 8 Aire de répartition du pin à crochets selon l'Atlas Florae Europaeae

La sélection des vieux peuplements de pin à crochets

Afin de reconstruire le climat passé, les peuplements de pin à crochets les plus anciens ont été **prioritairement échantillonnés**. Sur la base des travaux d'Hatem (2010), une analyse diachronique a été réalisée à l'échelle du massif du Vercors dans le but de localiser les vieux peuplements de pin à crochets. Cette cartographie a été complétée par les données fournies par le PNRV.

Les placettes sélectionnées sont au nombre de 11, 4 dans le PNRV et 7 sur les Hauts plateaux du Vercors. (Figure 9)

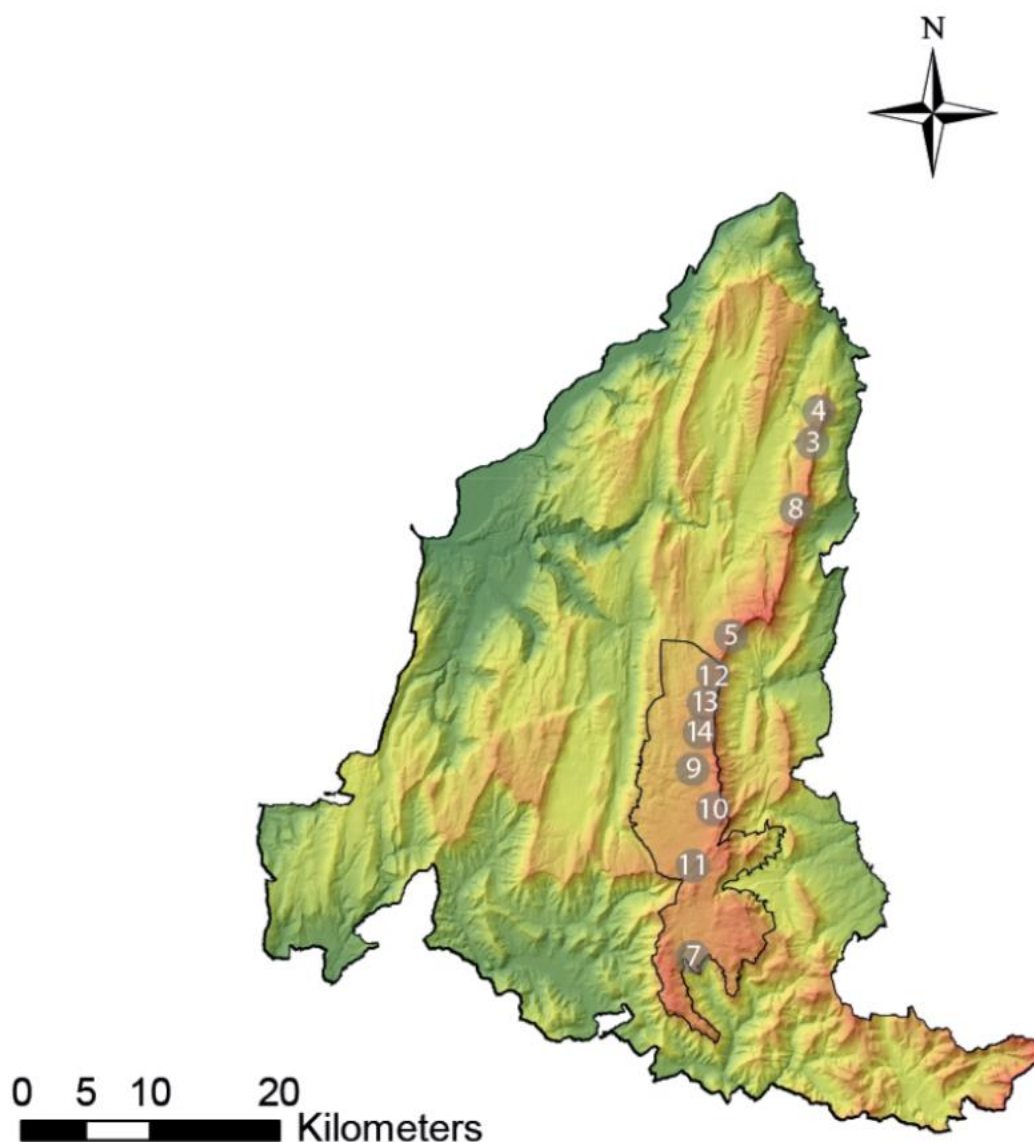


Figure 9 Localisation géographique des placettes d'échantillonnage du pin à crochets

Un choix d'individu rigoureux

Afin d'optimiser la détection du signal climatique, **seul les individus les mieux formatés** ont été échantillonnés. Les arbres dominés/dominants, étêtés, dépérissant, ou ayant subi des traumatismes visibles (liés au vent ou aux processus géomorphologiques) ont été exclus.

b. Les données climatiques

Les données HISTALP

La base de données Histalp recense le plus grand nombre de séries climatiques homogénéisées à travers les Alpes (Efthymiadis et al., 2006 ; Auer et al., 2008). Les données climatiques sont disponibles sous forme de points de grille avec une résolution de 1*1 degré (températures et pressions atmosphériques) ou 5*5 minutes (précipitations) au pas de temps mensuel. Les points de grille utilisés pour notre analyse couvrent une surface qui s'étend entre 4°E-19°E et 43°-49°N. Les séries de précipitation couvrent la période 1801-2003, les températures la période 1780-2003. Au total, 5 points de grilles ont été utilisés (Figure 10). Disponible en données brutes, ces données ont été transformées en anomalies. Pour cela, les écarts à la moyenne 1961 à 1990, considérée en climatologie comme le reflet du climat moyen, ont été calculés.

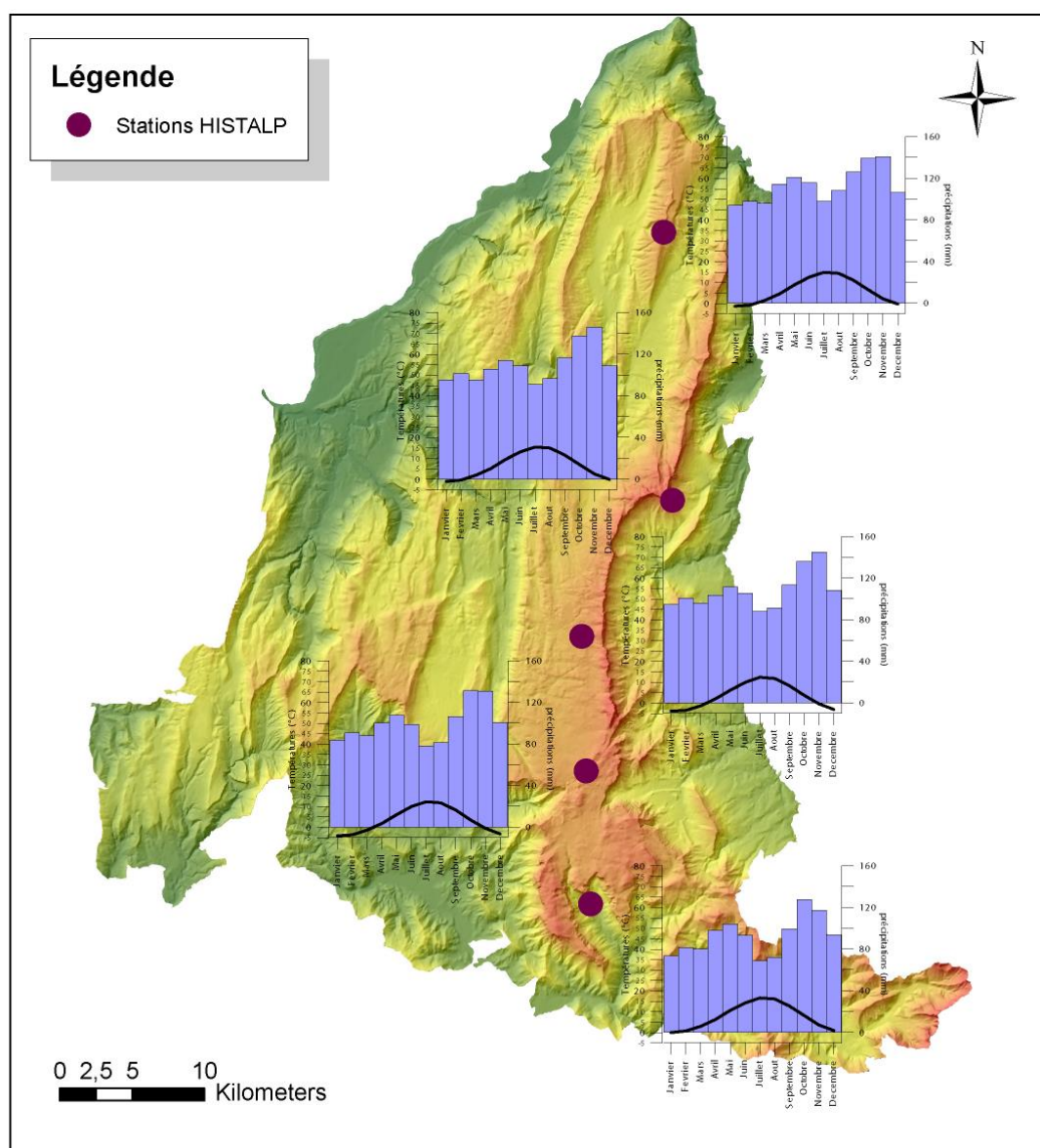


Figure 10 Localisation des stations HISTALP sur le Massif du Vercors

Les données instrumentales de Météo France

Les séries des stations Météo France ont également été utilisées dans notre analyse. Le choix des stations a été réalisé en fonction de : la position de la station (à l'intérieur du massif), la longueur des séries (les séries les plus longues ont été privilégiées) et le caractère continu des données météorologiques. Notre choix s'est porté sur les stations de Villard-de-Lans qui dispose d'une série météorologique qui couvre la période 1959–2013 (Tableau 4) et d'Autrans qui couvre la période 1905–2013 (Tableau 5) Cette dernière présente cependant des lacunes pendant la première et la seconde guerre mondiale. Ainsi, les années 1939, 1940, 1944, 1945, 1947, 1948, 1949 sont manquantes. Certains mois sont également absents de la série: août et septembre de 1914, juillet à septembre de 1934, juin à septembre de 1938, avril à juin de 1941 et avril de 1950.

Nom	Villard-de-Lans
Informations géographiques	
Latitude	45°04'42"N
Longitude	5°33'36"E
Altitude	1024 mètres
Producteurs	
De 1959 à 2013	METEO-FRANCE
Référence temporelle	
Période	De janvier 1959 à décembre 2013
Mois	avril à septembre
Paramètre	
Libellé	Cumul des hauteurs des précipitations
Unité	Millimètres et 1/10
Pas de temps	Mensuel
Généralités	
RR minimal (mm)	2,1
RR maximal (mm)	336,5
RR moyen (mm)	105,47
Données manquantes	4

Tableau 4 Fiche récapitulative de la station météorologique de Villard-de-Lans

Nom	Autrans
Informations géographiques	
Latitude	45°10'54"N
Longitude	5°33'12"E
Altitude	1090 mètres
Producteurs	
De 1905 à 1969	ELECTRICITE DE FRANCE
De 1970 à 2013	METEO-FRANCE
Référence temporelle	
Période	De janvier 1905 à décembre 2013
Mois	avril à septembre
Paramètre	
Libellé	Cumul des hauteurs des précipitations
Unité	Millimètres et 1/10
Pas de temps	Mensuel
Généralités	
RR minimal (mm)	1
RR maximal (mm)	346,5
RR moyen (mm)	127,06
Données manquantes	58

Tableau 5 Fiche récapitulative de la station météorologique d'Autrans

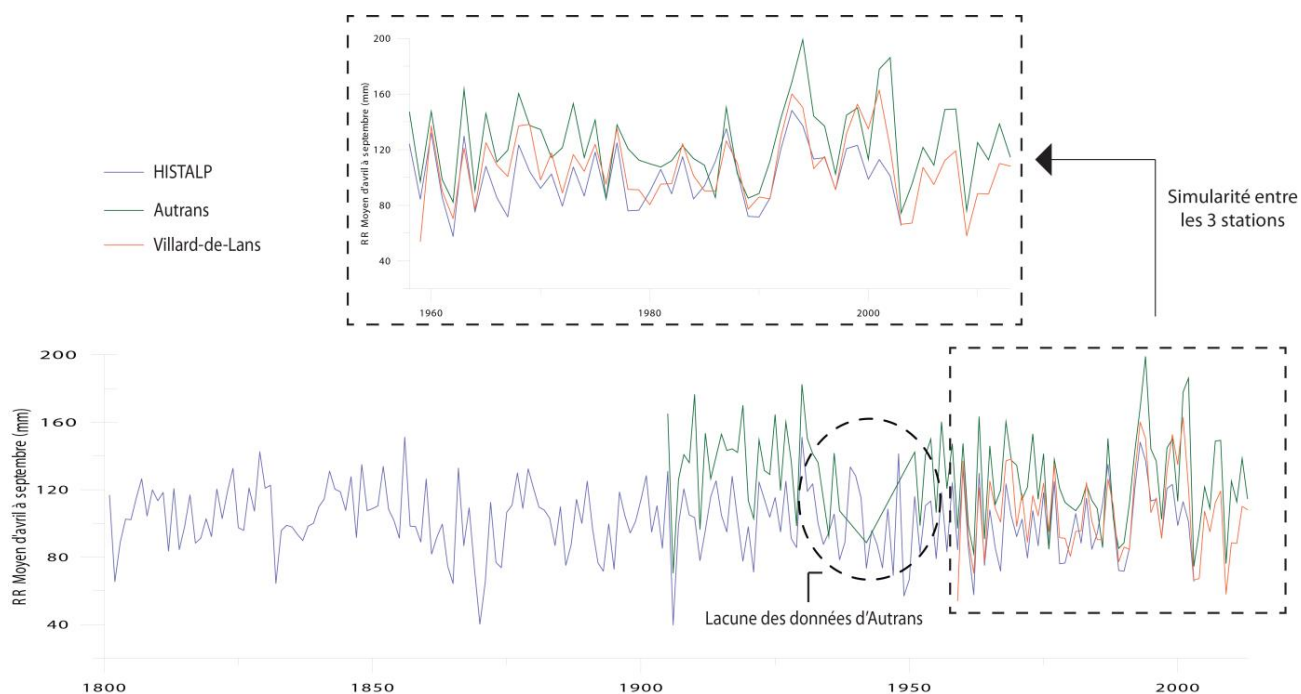


Figure 11 Données pluviométriques d'avril à septembre des trois stations météorologiques

APPROCHE DENDROCHRONOLOGIQUE

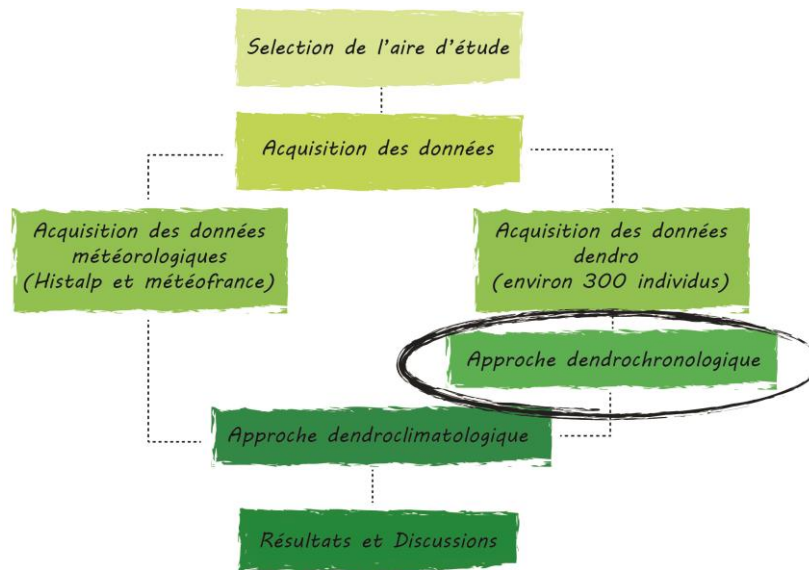


Figure 12 La démarche méthodologique développée dans ce mémoire

Avant de développer la méthodologie employée pour le traitement des échantillons, il semble judicieux de rappeler quelques éléments concernant la syntaxe utilisée.

- **Une série individuelle de largeurs de cernes** = série temporelle de résolution annuelle obtenu par la mesure des cernes d'un échantillon (carotte).
- **Une série moyenne de largeur de cernes** = moyenne de série individuelles interdatées (provient de l'agrégation de plusieurs carottes d'un même arbre)
- **Une chronologie** = agrégation de séries moyennes de largeur de cernes (correspond à la croissance moyenne d'un peuplement)

I. Méthode de prélèvement des échantillons

L'échantillonnage

A l'aide d'une **tarière de Pressler**, (Figure 13) deux carottes ont été prélevées sur chaque arbre à **30 centimètres** du sol. Chaque prélèvement est effectué **perpendiculairement à la pente** afin d'éviter toute perturbation liée à la déformation du bois (bois de compression). Cette méthode d'échantillonnage peu destructive n'entraîne aucun impact négatif sur la croissance des individus (Van Mantgen et Stephenson, 2004). Après prélèvement, les échantillons sont **stockés dans des containers numérotés**. Chaque individu est **géoréférencé** à



Figure 13 Echantillonnage avec une tarière de Pressler

l'aide d'un GPS (précision de 6 à 8 mètres avant traitement ; 1 mètre après traitement). Ces coordonnées sont ensuite intégrées dans une base de données dans le logiciel ArcGis.

La préparation des échantillons

La préparation des échantillons en laboratoire est une **étape cruciale** pour un traitement optimal des informations contenues dans les cernes de croissance. Une fois retiré de la paille, l'échantillon est soigneusement **collé à l'aide d'une colle à bois** sur des planches à bois (Figure 14) préalablement rainurées (profondeur 2 millimètres et largeur de 5 millimètres). **La position de la fibre de bois doit être perpendiculaire à la planche** (Iseli et Schweingruber, 1989). Si le positionnement de la carotte n'est pas optimal, la lecture des cernes est impossible.



Figure 14 Carottes collées sur une planche à bois préalablement rainurée

Après un **séchage de 12h**, chaque échantillon fait l'objet d'une préparation à l'aide d'une **ponceuse orbitale professionnelle**. La première étape consiste à rendre la partie ronde de la carotte la **plus plane possible** avec un grain de disque grossier (120). Puis, il faut **lisser la surface** avec un disque à grain plus fin (320). Et pour finir, il faut **lustrer** cette dernière avec un disque à grain très fin (600) permettant d'optimiser la visibilité du cerne.

Ensuite, sous la loupe binoculaire, **chaque cerne est ensuite pointé**. Le dernier cerne formé est celui qui se trouve au contact de l'écorce. En ce qui nous concerne, l'échantillonnage a été réalisé avant le démarrage de la période de végétation de l'année 2014. Le dernier cerne de croissance est donc celui de 2013. Au crayon gris, chaque **décennie est pointée avec 1 point**, **2 points sont utilisés pour identifier le demi-siècle** et **3 points marquent le siècle** (Figure 15). Cette première étape permet de vérifier l'interdatation lors de la mesure des cernes.



Figure 15 Pointage d'une carotte (âgé de 113 ans)

II. Le comptage des cernes et création d'une chronologie de référence

Le pointage des cernes sur Coorecorder

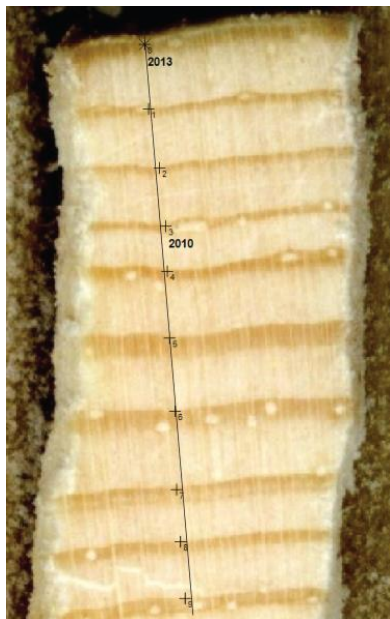


Figure 16 Pointage des cernes sur coorecorder

Afin de réaliser les mesures de largeur de cernes, les échantillons sont au préalable scannés à très haute résolution (1200DPI). Les mesures sont réalisées au moyen du logiciel Coorecorder (Cybis Elektronik & Data AB, 2001) à partir de l'image numérisée. Chaque cerne est repéré sur l'image et le logiciel convertit le nombre de pixels entre deux repères en largeur. La précision dépend de la résolution du scanner mais est évaluée au 1/10 de mm. Afin d'optimiser la mesure, les repères de cernes doivent être placés à la fin du bois final et doivent être alignés perpendiculaires aux cernes (Figure 16).

L'interdatation au moyen du logiciel CDendro

La fonction de base utile dans ce logiciel est le **coefficient de corrélation R** (Pearson, 1896). Il permet de déterminer l'intensité de la liaison entre deux variables quantitatives. En d'autres termes, il permet de définir le pourcentage de variance commun à deux carottes, individus ou population. Ce coefficient est compris entre -1 et 1. Dans notre cas un $r > 0,5$ pour un recouvrement supérieur à 100 ans a été jugé significatif.

Dans chaque placette, les séries individuelles issues de chaque carotte sont interdatées puis moyennées afin de former une **série moyenne de largeurs de cernes**. Une fois les séries moyennes interdatées celles-ci sont moyennées afin de former une **chronologie**. L'interdatation de l'ensemble des séries moyennes qui composent la chronologie est finalement vérifiée et validée au moyen d'une matrice de corrélations. L'interdatation est considérée comme satisfaisante lorsque le coefficient de corrélation entre les séries moyennes est **supérieur à 0,5** pour un recouvrement de 100 ans. Les **individus mal interdatés** ou non corrélés significativement à la chronologie moyenne sont **exclus** de l'analyse. Un protocole identique est utilisé dans chaque placette et 11 chronologies ont été produites, une par placette. Le pourcentage d'échantillons exclus varie de 0 à 50% selon les placettes. La chronologie de référence du massif du Vercors, établie avec 250 arbres (500 carottes) provenant des 11 placettes couvrent ainsi la période 1755 à 2013 (Figure 17 et tableau 6).

L'objectif de l'analyse dendroclimatologique est de reconstruire le climat passé à l'échelle du massif du Vercors. Afin d'optimiser la reconstruction du signal climatique, un protocole en trois étapes a été utilisé :

- l'ensemble des séries moyennes interdatées ont été regroupées au sein d'une **chronologie assimilable à une grande placette (GP)** couvrant l'ensemble du massif.
- une matrice de corrélation a été produite pour GP et seules les séries moyennes dont le coefficient de **corrélation était $>0,7$** avec la chronologie de référence ont été retenues
- enfin, **une chronologie moyenne** a été produite pour GP. Cette chronologie est utilisée pour réaliser la reconstruction climatique (Figure 18).

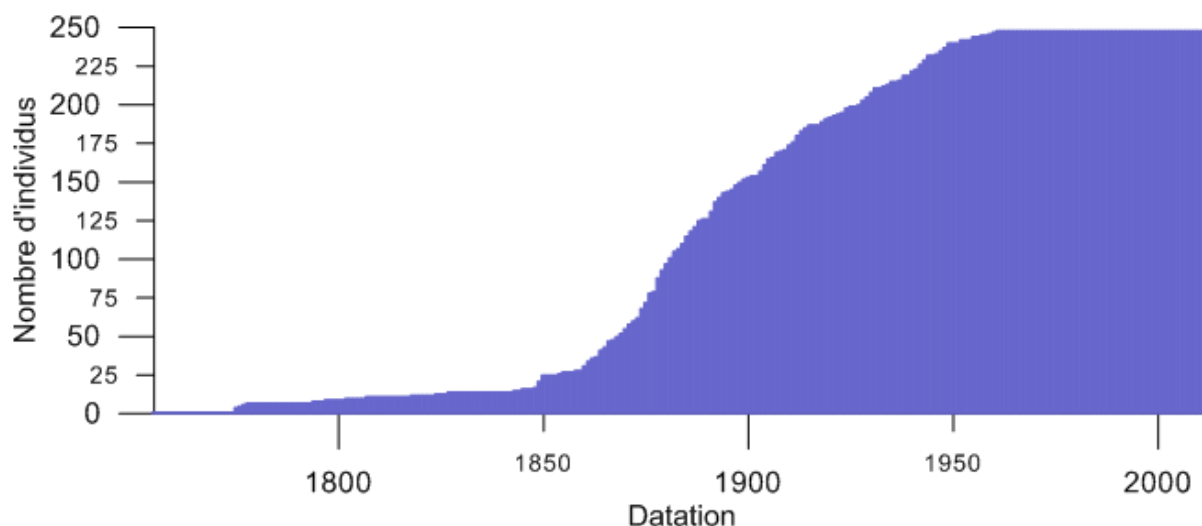


Figure 17 Nombre d'arbres présent pour chaque année sur l'ensemble du massif du Vercors

Placette	Coordonnées GPS	Altitude moyenne (mètres)	Nombre d'individu par population	Nombre d'arbres retenus	Date de la chronologie	Nombre d'année	Nombre de cerne total
4	5°38'7,034"E 45°9'14,95"N	1 750	30	21	1824-2013	190	2974
3	5°38'7,939"E 45°8'22,704"N	1 650	30	19	1849-2013	165	2187
8	5°37'0,216"E 45°5'39,643"N	1 800	32	22	1865-2013	149	1996
5	5°32'35,599"E 45°0'18,113"N	1 800	22	17	1807-2013	207	1741
12	5°31'20,876"E 44°58'40,709"N	1 750	30	26	1849-2013	165	3232
13	5°31'20,124"E 44°57'33,542"N	1 830	30	25	1755-2013	259	3928
14	5°31'3,703"E 44°56'20,167"N	1 890	27	23	1775-2013	239	2480
9	5°30'6,66"E 44°54'31,008"N	1 630	30	18	1818-2013	196	2602
10	5°30'48,391"E 44°53'5,008"N	1 690	25	22	1866-2013	148	2902
11	5°29'56,821"E 44°50'42,872"N	1 660	30	30	1755-2013	259	3809
7	5°29'25,746"E 44°46'28,74"N	1 630	30	27	1850-2013	164	2870
Total			316	250			30721

Tableau 6 Identification des 11 placettes selon un axe Nord (haut du tableau) / Sud (bas du tableau)

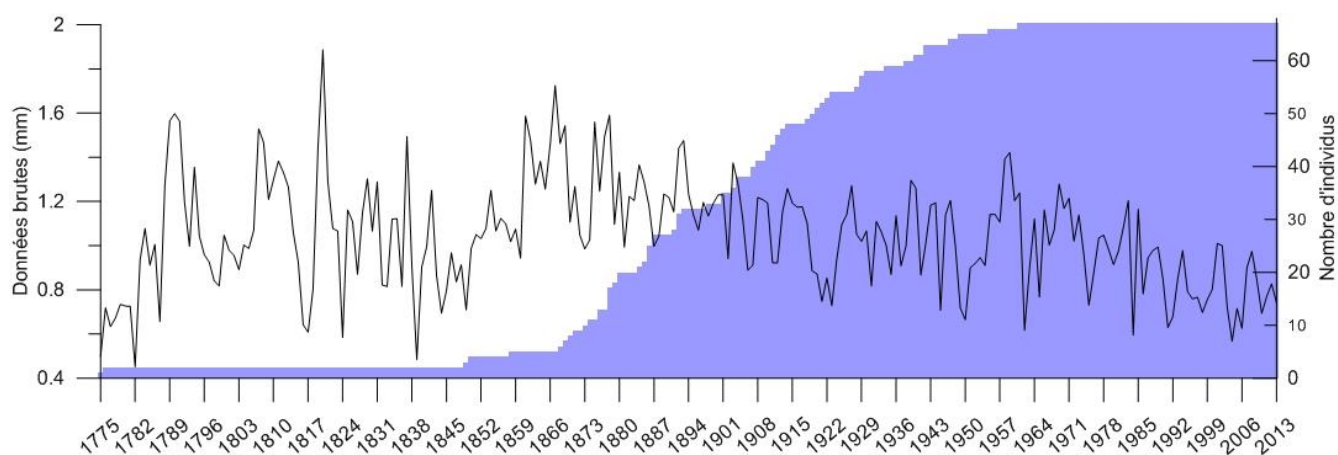


Figure 18 Chronologie de référence non standardisée de la Grande Placette et le nombre d'arbre présent pour chaque année sur l'ensemble du massif du Vercors

APPROCHE DENDROCLIMATOLOGIE

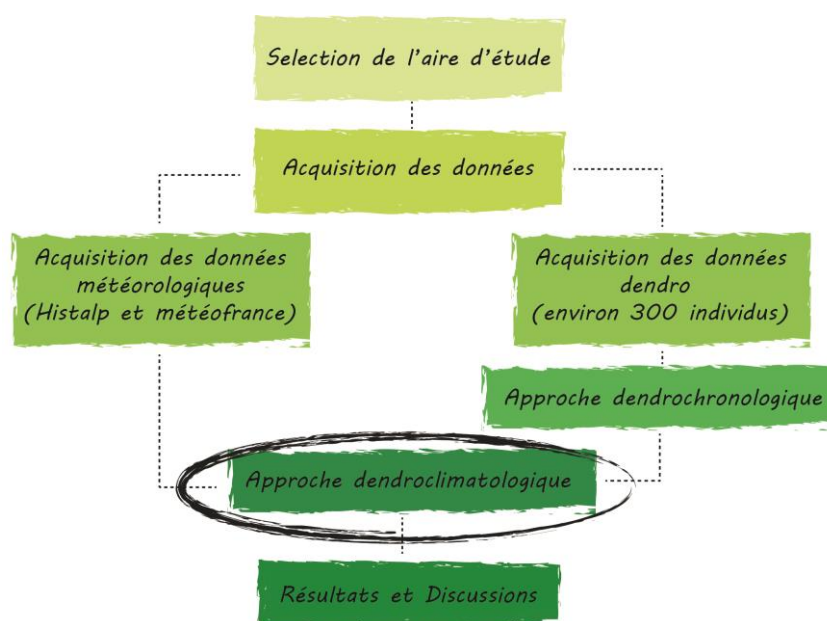


Figure 19 La démarche méthodologique développée dans ce mémoire

L'ensemble des étapes qui suivent repose sur l'utilisation des routines de P.Mérian (2012, (R : <https://sites.google.com/site/pierreemerian/rscripts>)).

I. L'identification des années caractéristiques au moyen de la routine Pointer.R

Cette routine (logiciel R) permet de **déterminer les années caractéristiques** (pointer years). Elle est basée sur la méthode développée par Becker (1989) et Becker et al (1994). Cette approche utilise les séries brutes de largeur de cerne (en millimètre). La méthode de Becker (1989) repose sur le calcul de l'écart relatif **ER** de la largeur de cerne **LC** entre les années k et $k-1$ (Mérian, 2012) :

$$ER_k = \frac{LC_k - LC_{k-1}}{LC_{k-1}}$$

L'écart relatif minimal pour qu'un changement de croissance soit considéré comme significatif entre les cernes de l'année $n-1$ ($k-1$) et n (k) a été fixé à 25%. Le pourcentage d'arbres de la placette montrant un cerne caractéristique pour l'année n a été fixé à 60% pour faire ressortir une année caractéristique positive ou négative. Autrement dit, une année n est considérée comme caractéristique lorsque **60% des individus de la placette présentent une augmentation (ou une réduction) de croissance de 25% par rapport à l'année n .**

Les limites de cette approche reposent dans la prise en compte de deux années pour le calcul des années caractéristiques. De ce fait, une série de cernes anormalement large (ou étroits) sont difficiles à mettre en évidence.

II. Standardisation des données

La standardisation de la série brute de largeur de cerne a pour objectif de **conserver seulement le signal à haute fréquence de la chronologie** (Fritts, 1976 ; Schweingruber, 1900).

Elle est censée **retirer les signaux qui peuvent interférer dans la relation cerne / climat**. L'autre intérêt est de transformer la **série brute de largeur de cerne en indices adimensionnels**. La standardisation est réalisée pour chaque série moyenne de largeur de cernes et permet de transformer les séries brutes (en mm) en série d'indices de croissance. (Lebourgeois et Mérian, 2012).

En dendroclimatologie, il existe différents types de standardisation. Après, les avoir toutes testées, dans cette étude une double standardisation (Figure 18) a été retenue (Mérian, 2012) :

- **Standardisation au moyen d'une courbe négative exponentielle, d'une droite ou de la moyenne** : Cette standardisation permet de retirer la tendance d'âge. Cette tendance, géométrique, indépendante du climat correspond à la diminution de la largeur du cerne consécutive à l'augmentation du diamètre de l'arbre. Lorsque le prélèvement atteint la moelle la courbe exponentielle négative est utilisée. Dans le cas contraire, une régression linéaire ou une droite correspondant à la croissance de l'arbre est utilisée ?
- **Standardisation au moyen d'une courbe spline** : cette méthode permet d'ajuster le signal dendrochronologique à une courbe spline plus ou moins flexible. Cette méthode permet d'éliminer les fluctuations de moyenne fréquence (liées à la compétition par exemple) du signal dendrochronologique.

Afin d'éliminer les corrélations pouvant persister entre l'année $n-1$ et l'année n (du fait notamment de la constitution de réserves l'autocorrélation est retiré des données indicées au moyen d'un bruit blanc).

Cette double standardisation a été réalisée sur l'ensemble des 67 individus qui constituent la grande placette. L'ensemble des séries de moyennes indicées a ensuite été agrégée pour constituer une chronologie moyenne indicée pour la grande placette.

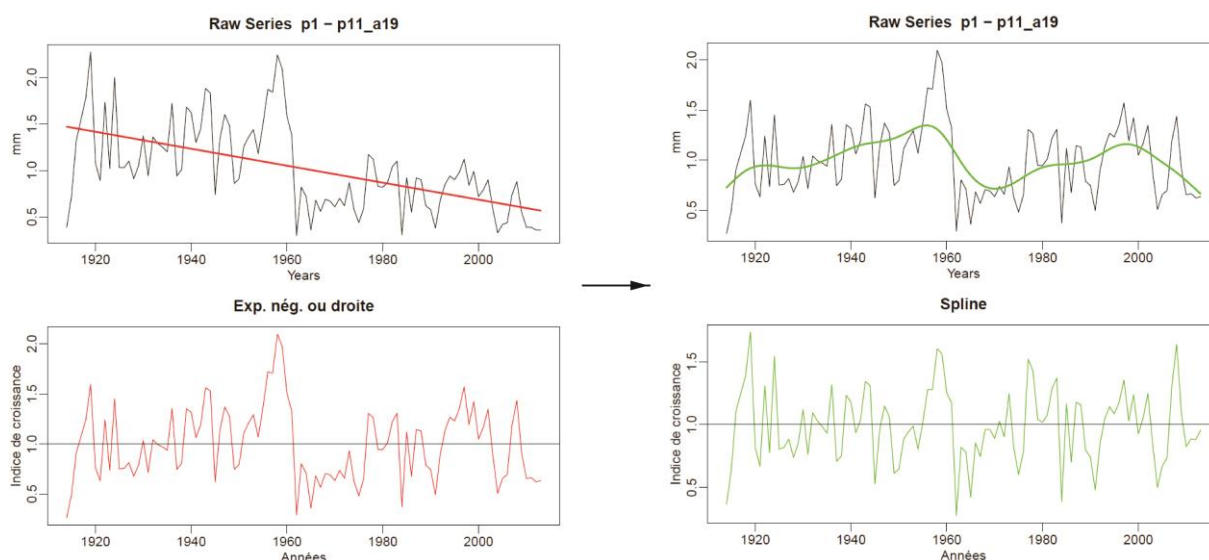


Figure 20 Double standardisation, la première de nature droite et la seconde de nature spline

III. Relation cerne/climat

La fonction de réponse

La fonction de réponse a pour objectif d'étudier **quels paramètres climatiques influencent en premier lieu sur la croissance radiale et à quelle intensité** (Payette et Filion, 2010). Fritts (1971) définit la fonction de réponse comme « l'équation de calibration statistique exprimant les effets relatifs séparés de plusieurs facteurs climatiques sur l'épaisseur des cernes ». Les observations climatiques sont divisées en deux jeux indépendants (calibration, vérification). Aussi, la procédure de type ré-échantillonnage appelé bootstrap est employé. Elle permet de tirer au sort les années qui vont être nécessaires à la calibration et d'utiliser les autres comme jeu de vérification. La répétition de la calibration est répétée 30 fois fournissant 30 estimations du coefficient de vérification pour les paramètres climatiques. La significativité des coefficients de corrélation doit être égal ou supérieur à 95% afin que la fonction de réponse soit statistiquement fiable. Les données utiles pour une telle analyse sont les indices de croissance des cernes et les paramètres climatiques (température et précipitation, HISTALP).

Comme le précise Petitcolas (1996), le climat influence la croissance du *Pinus uncinata* Mill. à l'année $n-1$ et n . **La période d'analyse de la fonction de réponse se porte du mois de mai ($n-1$) jusqu'au mois de septembre (n) des années 1900 à 2000.**

La fonction de réponse mobile

La fonction de réponse mobile correspond à une succession de fonctions de réponse simples calculées sur la base d'un intervalle **de calcul mouvant** (moving intervals). Elle permet de mettre en évidence des modifications temporelles (shifts) des paramètres climatiques qui conditionnent la croissance de l'arbre. Les fonctions de réponses sont calculées sur des périodes de temps de longueurs constantes décalées d'un an (Mérian, 2012). Dans notre étude, l'intervalle choisi a une **durée de 50 ans**. Ainsi, avec les données Histalp, une première fonction de réponse est calculée sur la période 1801–1850, la seconde sur l'intervalle 1802–1851, la troisième sur l'intervalle 1803–1852.

La dernière fonction de réponse couvre la période 1964–2003. L'intervalle de 50 ans est suffisant pour obtenir des résultats statistiquement significatifs. Un intervalle de durée inférieure ne permet pas d'obtenir des résultats robustes en raison de la longueur insuffisante des intervalles de validation et de calibration. Des intervalles plus longs ne permettent pas de saisir précisément d'éventuelles modifications des paramètres climatiques qui contraignent la croissance de l'arbre.

IV. Les paramètres utiles pour la reconstruction climatique

Les écarts à la moyenne des précipitations des données HISTALP

Le traitement de la chronologie des cernes en dendroclimatologie est basé sur l'utilisation de la [station centrale](#) (5°30 E ; 44°49' N) [HISTALP](#) du Massif du Vercors. Ce choix s'est orienté vers cette localisation géographique car elle n'est ni trop au nord ni trop au sud. Elle est considérée comme la représentation du [climat moyen sur ce massif](#).

Après avoir étudié la fonction de réponse qui permet d'observer la relation cerne/climat, c'est à dire l'impact du climat vers la croissance radiale, les fonctions de transfert jouent un tout autre rôle. En effet, elles ciblent les informations présentes dans la chronologie de référence, ici c'est celle de GP, afin de constituer une reconstruction climatique.

La reconstruction climatique

Pour effectuer une reconstruction climatique, il est indispensable de connaître le paramètre climatique qui influence la croissance du végétal et à quelle période de l'année. Le paramètre climatique à reconstruire est [la pluviométrie sur une période de référence de 1920 à 1969](#).

La validation de la reconstruction se fait en trois étapes. Dans un premier temps, il faut [choisir la période](#) qui permettra une reconstruction adéquate. Le premier intervalle de temps utilisé est le plus large, c'est-à-dire de 1801 à 2003. Ensuite, [la sélection](#) se base sur la représentation de la reconstruction et des données HISTALP afin de remarquer la zone où les [courbes semblent en adéquation](#). Après plusieurs essais, l'intervalle de temps retenu est de 1920 à 1969. Ainsi, les données instrumentales HISTALP sont divisées en deux, P1 et P2. P1 (1920–1944) est exploitée pour [la calibration](#) du paramètre climatique tandis que P2 (1945–1969) est utilisé pour [la vérification](#) de la reconstruction et inversement. Des indices statistiques reflètent la qualité de la reconstruction. Le coefficient de détermination R^2 entre la chronologie indicée de largeur de cerne et les données météorologiques permet de cerner le pourcentage de variance expliqué par les séries de cerne. La significativité du R^2 est testée au moyen du test t de Student. Le climat reconstitué est testé afin de définir s'il est un meilleur prédicteur du climat réel que la moyenne des données d'étalonnage ou que celle des données de vérification. [La réduction de l'erreur](#) (RE) de Lorenz (1956) est d'abord calculée suivie du [coefficient CE de Briffa et al](#) (1988). A l'heure actuelle, il n'existe pas de seuil prédéfini pour affirmer qu'une reconstruction climatique est acceptable ou non. Or, lorsque RE et CE sont négatifs, les reconstructions sont moins bonnes que la moyenne climatique. C'est pour cela que le seuil 0 représente la limite inférieure acceptable. Ainsi, plus ces valeurs sont élevées, plus la reconstruction sera convenable (Payette et Filion, 2010).

La reconstruction au moyen d'une régression linéaire est à l'origine d'une diminution de la variance dans les données reconstruites. Afin de corriger ce biais, on utilise [une méthode dite de « Scaling »](#). Cette dernière ajuste les données reconstruites aux données météorologiques afin que les [deux séries](#) aient [la même moyenne et le même écart type](#). Pour réaliser ce Scaling, il faut : soustraire la moyenne de la reconstruction sur l'intervalle de temps choisi (1920-1969) à la moyenne de la reconstruction complète (1775 à 2013). Ce résultat est multiplié par le rapport entre l'écart type des données HISTALP (1920-1969) sur l'écart type de la reconstruction (1920-1969). Ainsi de 1920 à 1969, la moyenne et l'écart type sont identiques entre la reconstruction et les données HISTALP.

Dans un troisième temps, les [précipitations sont comparées avec les données météorologiques de météo France](#) de Villard-de-Lans et Autrans. Ces données sont considérées comme indépendantes comme elles n'ont pas été utilisées dans la reconstruction. Le pourcentage de variance commun à la reconstruction et aux données météo France est évalué au moyen d'un coefficient de détermination (R^2). Les années caractéristiques climatiques (sèches et humides) et de croissance radiale (faible ou forte) servent de « repères » pour vérifier la robustesse de la reconstruction.

PARTIE 3 Les résultats et la discussion

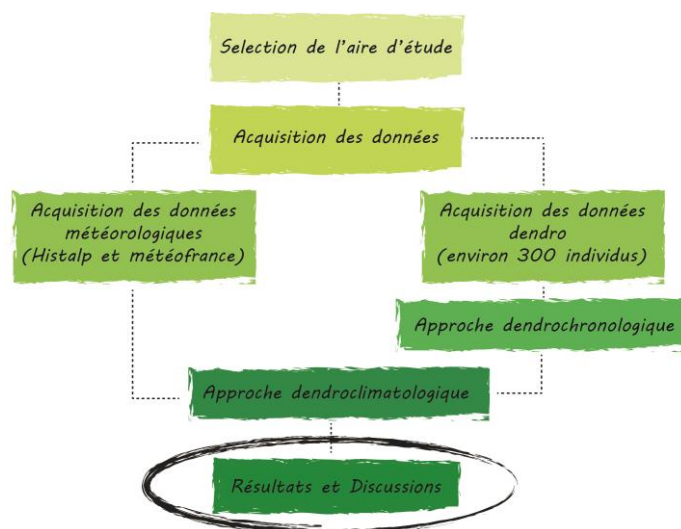


Figure 21 La démarche méthodologique développée dans ce mémoire

Résultats

I. Les données météorologiques

Une corrélation entre les trois séries climatiques

Bien que les stations météorologiques soient de plus en plus viables par l'amélioration des instruments utiles aux relevées, il est nécessaire d'établir la part de confiance que l'on a dans ces séries. Les données HISTALP issues d'une interpolation des stations météo présentent sur le territoire doivent être mises en relation avec les paramètres instrumentés de Villard-de-Lans et Autrans. Par les variabilités spatiales et altitudinales, il est possible d'obtenir des variations importantes de relevé des paramètres climatiques entre les stations météo de terrain. Lors de la mise en relation des écarts à la moyenne (1961–1990) des précipitations des mois de juin et juillet, il y a un coefficient de détermination (R^2) entre HISTALP et Villard-de-Lans de 0,74. Entre HISTALP et Autrans, il équivaut à 0,85. Et enfin, entre Villard-de-Lans et Autrans, il y a une relation de 0,74.

II. La création de la chronologie de référence du massif du Vercors

Un signal commun entre les placettes

L'inter corrélation entre chaque placette a un résultat moyen de 0,71 (Figure 22). La corrélation minimale est de 0,6 entre la placette 4 et un maximum de 0,82 pour la placette 12. Les placettes qui corrélaient le moins ensemble sont la 4 et la 11 avec un R de 0,42. Les placettes qui se corrélaient le mieux sont la 13 et 14 avec un R de 0,79.

		Rest			Placette 10			Placette 11			Placette 12			Placette 13			Placette 14			Placette 3			Placette 4			Placette 5			Placette 7			Placette 8			Placette 9							
	Years	Corr	Ttest	Olap	Corr	Ttest	Olap	Corr	Ttest	Olap	Corr	Ttest	Olap	Corr	Ttest	Olap	Corr	Ttest	Olap	Corr	Ttest	Olap	Corr	Ttest	Olap	Corr	Ttest	Olap	Corr	Ttest	Olap	Corr	Ttest	Olap	Corr	Ttest	Olap					
Rest					0,76	14	147		0,62	12,3	238	0,82	18,1	164	0,72	15,8	238	0,77	14,3	147	0,77	15,5	164	0,6	10,3	189	0,67	13	206	0,71	12,6	163	0,76	14,1	148	0,68	12,8	195				
Placette 10	148	0,76	14	147				0,74	13,3	147		0,67	10,9	147	0,7	11,7	147	0,55	8,0	147	0,64	10	147	0,72	12,7	147	0,64	10,1	147	0,67	10,9	147	0,53	7,5	147	0,69	11,5	147				
Placette 11	259	0,62	12,3	238	0,74	13,3	147				0,73	13,5	164		0,61	11,7	238	0,66	10,6	147	0,74	14	164	0,42	6,4	189	0,55	9,3	206	0,57	11,5	163	0,68	11,3	148	0,64	11,6	195				
Placette 12	165	0,82	18,1	164	0,67	10,9	147	0,73	13,5	164					0,78	15,9	164	0,75	13,6	147	0,64	10,5	164	0,66	11,1	164	0,72	13,1	164	0,57	8,7	163	0,73	12,9	148	0,75	14,3	164				
Placette 13	239	0,72	15,8	238	0,7	11,7	147	0,61	11,7	238	0,78	15,9	164				0,79	15,3	147	0,79	15,3	147	0,6	9,1	147	0,63	9,6	147	0,62	9,6	147	0,65	10,2	147	0,69	11,4	147	0,72	12,5	147		
Placette 14	148	0,77	14,3	147	0,55	8,0	147	0,66	10,6	147	0,75	13,6	147							0,6	9,1	147	0,63	9,6	147	0,62	9,6	147	0,62	9,6	147	0,65	10,2	147	0,69	11,4	147	0,72	12,5	147		
Placette 3	165	0,77	15,5	164	0,64	10	147	0,74	14	164	0,64	10,5	164	0,71	13	164		0,6	9,1	147				0,68	12	164		0,68	12	164	0,64	10,6	164	0,55	8,3	163	0,78	15,3	148	0,67	11,4	148
Placette 4	190	0,6	10,3	189	0,72	12,7	147	0,42	6,4	189	0,66	11,1	164	0,62	10,8	189	0,63	9,6	147	0,68	12	164				0,51	8,1	189	0,75	14,2	163	0,64	10,2	148	0,47	7,3	189					
Placette 5	207	0,67	13	206	0,64	10,1	147	0,55	9,3	206	0,72	13,1	164	0,68	13,1	206	0,62	9,6	147	0,64	10,6	164	0,51	8,1	189				0,56	8,6	163	0,68	11,2	148	0,49	7,9	195					
Placette 7	164	0,71	12,6	163	0,67	10,9	147	0,67	11,5	163	0,57	8,7	163	0,67	11,3	163	0,65	10,2	147	0,55	8,3	163	0,75	14,2	163	0,68	11,2	148	0,57	8,5	148				0,57	8,5	148	0,61	9,7	163		
Placette 8	149	0,76	14,1	148	0,53	7,5	147	0,68	11,3	148	0,73	12,9	148	0,73	12,9	148	0,69	11,4	147	0,78	15,3	148	0,64	10,2	148	0,68	11,2	148	0,57	8,5	148				0,58	8,5	148	0,58	8,5	148		
Placette 9	196	0,68	12,8	195	0,69	11,5	147	0,64	11,6	195	0,75	14,3	164	0,64	11,6	195	0,72	12,5	147	0,67	11,4	164	0,47	7,3	189	0,49	7,9	195	0,61	9,7	163	0,58	8,5	148								

Figure 22 Corrélation chocolat entre chaque placette

La chronologie de la grande placette

Suite aux différentes façons de standardiser la chronologie de la GP, trois chronologies à indices de croissance sont créées. (Figure 23) Malgré une similarité entre la série d'indice de largeur de cerne vert et violet, nous retiendrons la double standardisation qui possède des résultats plus affinés (violet). Elle représente la première chronologie de référence du *Pinus uncinata* Mill. pour le massif du Vercors.

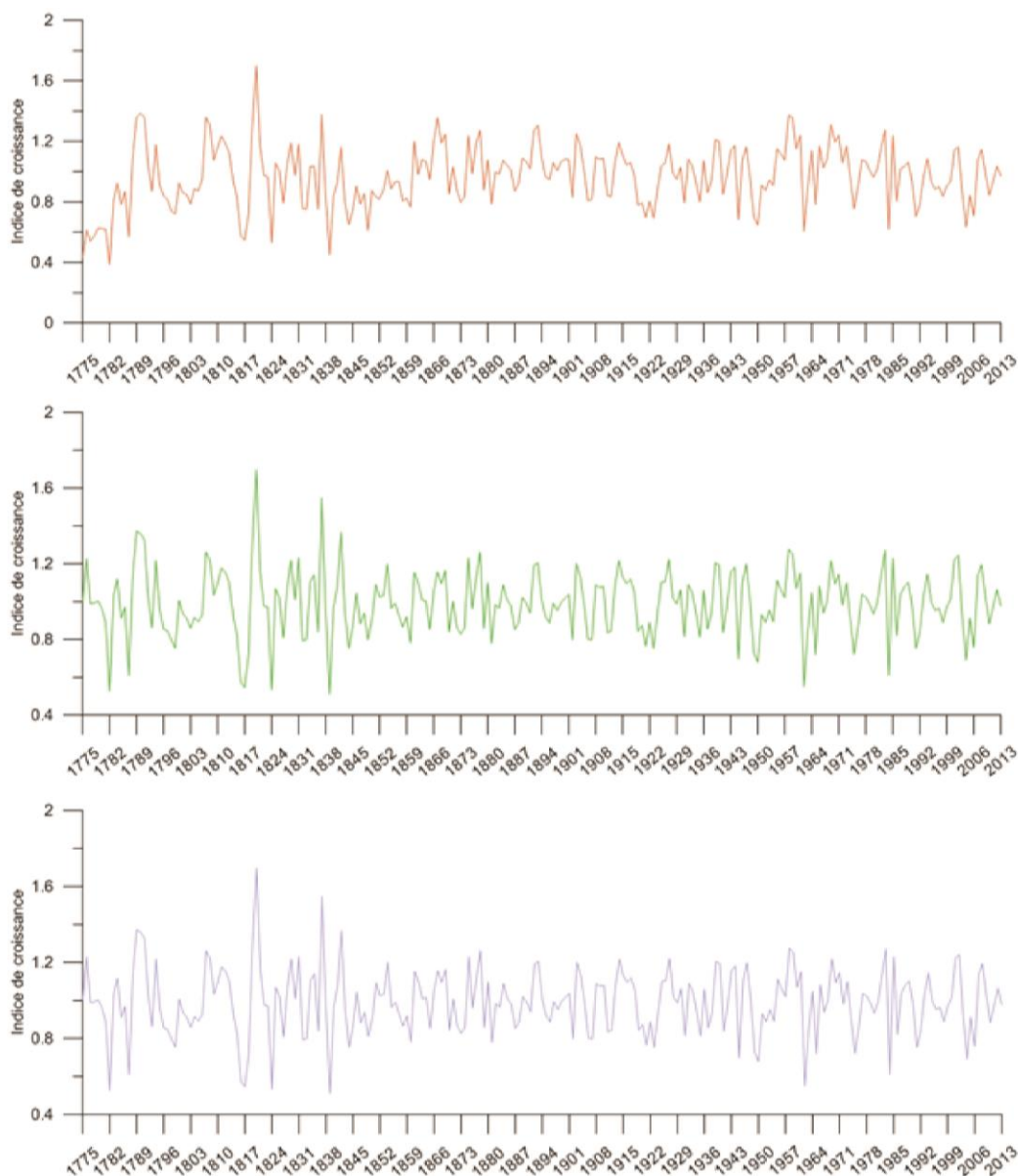


Figure 23
Standardisation simple
de type exponentielle
(orange) et de type
spline (vert).
Standardisation double
(violet)

La chronologie de référence de la grande placette commence en 1775 pour finir en 2013 (Figure 24). De 1775 à 1848, seulement deux individus composent la chronologie. A partir de 1846, les échantillons augmentent. En 1880, les individus atteignent le nombre de 20. Et enfin en 1961, la chronologie est à son apogée avec un total de 67 individus.

Entre 1775 et 1848, la chronologie a une fluctuation importante avec des indices de croissance variant de 0,5 à 1,7. De 1850 à 1948, ces fluctuations s'adoucissent avec une différence de 0,56 entre le taux minimal de 0,69 et le taux maximal de 1,26. Et à partir de 1945, les fluctuations redeviennent plus importantes avec des pics significatifs de 0,55 à 1,27.

Statistiquement, les indices de croissance de la chronologie sont traités avec les centiles afin de faire ressortir 10% des années à indice élevé et 10% à indice faible. Ainsi à partir des années 1880 (échantillon de 20 individus et plus), les années à indices élevés sont 1927, 1958, 1959, 1969, 1983, 1985, 2001 et 2002. Et les années à indices faibles sont 1881, 1921, 1923, 1945, 1949, 1950, 1962, 1965, 1984, 1991, 2004 et 2006.

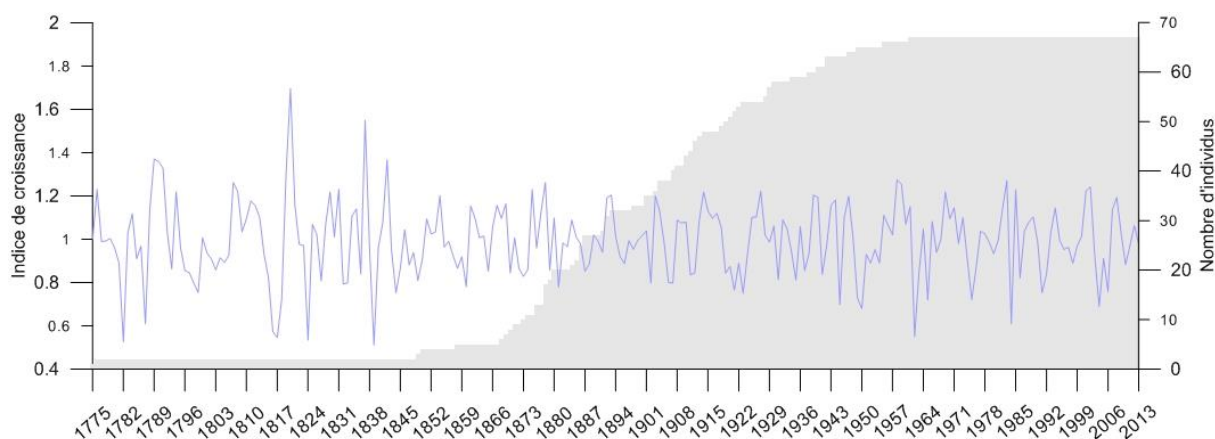


Figure 24 Chronologie de la Grande Placette après une double standardisation et le nombre d'arbre présent selon les années sur l'ensemble du massif du Vercors

III. Le comportement inter et intra-annuelle du pin à crochets

Les années caractéristiques depuis les années 1880

Au total, 12 années caractéristiques ressortent positivement depuis 1880. En 1985, 95,5% (64 arbres sur 67) des arbres montrent une augmentation de croissance > 25% par rapport à l'année 1994. Les années 1913 et 1932 sont les années caractéristiques positives les moins marquées avec un taux de 60,9% et 60,3%. La moyenne de significativité des années réunies est de 75%.

On dénombre sept années caractéristiques négatives. En moyenne de 82% des arbres montrent une réduction de croissance marquée au cours de ces années. En 1962 et 1984, 100% et 98,5% montrent une réduction de croissance significative. En 1881 ce taux atteint seulement 65%. Globalement les années caractéristiques positives sont plus nombreuses mais concernent moins d'individus que les années caractéristiques négatives.

Sur le plan temporel, une fréquence accrue des années caractéristiques négatives est observée entre 1941 et 1986. Les années caractéristiques positives sont réparties de manière plus homogène malgré une résilience importante entre 1932 et 1966 (7 années) puis plus faible depuis 1985 (2 années). De plus nous constatons, qu'une année caractéristique négative est souvent suivie d'une année caractéristique positive. C'est par exemple le cas, en 1945, une année caractéristique négative pour 90% des individus est suivie d'une année positive pour 87% des arbres (1946). Ce phénomène se reproduit pour plusieurs séries d'années, la dernière en 1986 (1962 et 1963, 1965 et 1966, 1984 à 1986). (Figure 25).

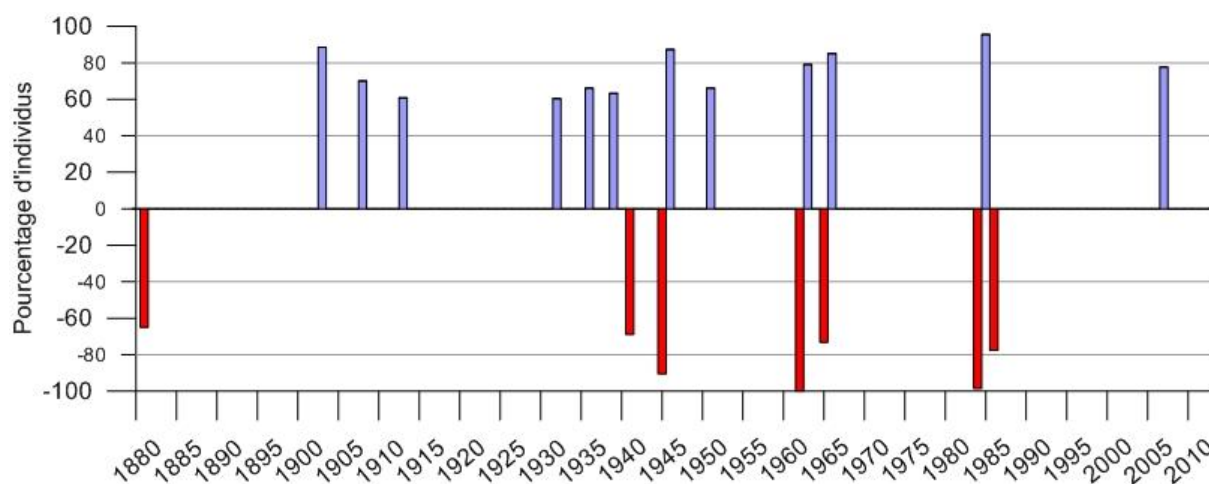


Figure 25 Années caractéristiques depuis les années 1880 suivant la méthode Pointer Year de Mérian (2010)

Les réponses mensuelles du *Pinus uncinata* Mill. face aux précipitations et aux températures

Les fonctions de réponse montrent que le pin à crochets réagit positivement aux précipitations du mois d'août de l'année $n-1$ et des mois de juin et juillet de l'année n indépendamment des années choisies pour la calibration et la validation. Ces coefficients positifs et significatifs révèlent qu'une hausse de la pluviométrie estivale au cours des années $n-1$ et n est favorable à la croissance radiale des pins à crochets. La réponse négative aux températures d'août $n-1$ révèle également la sensibilité des peuplements à l'aridité au cours de l'été précédant la formation du cerne (Figure 26).

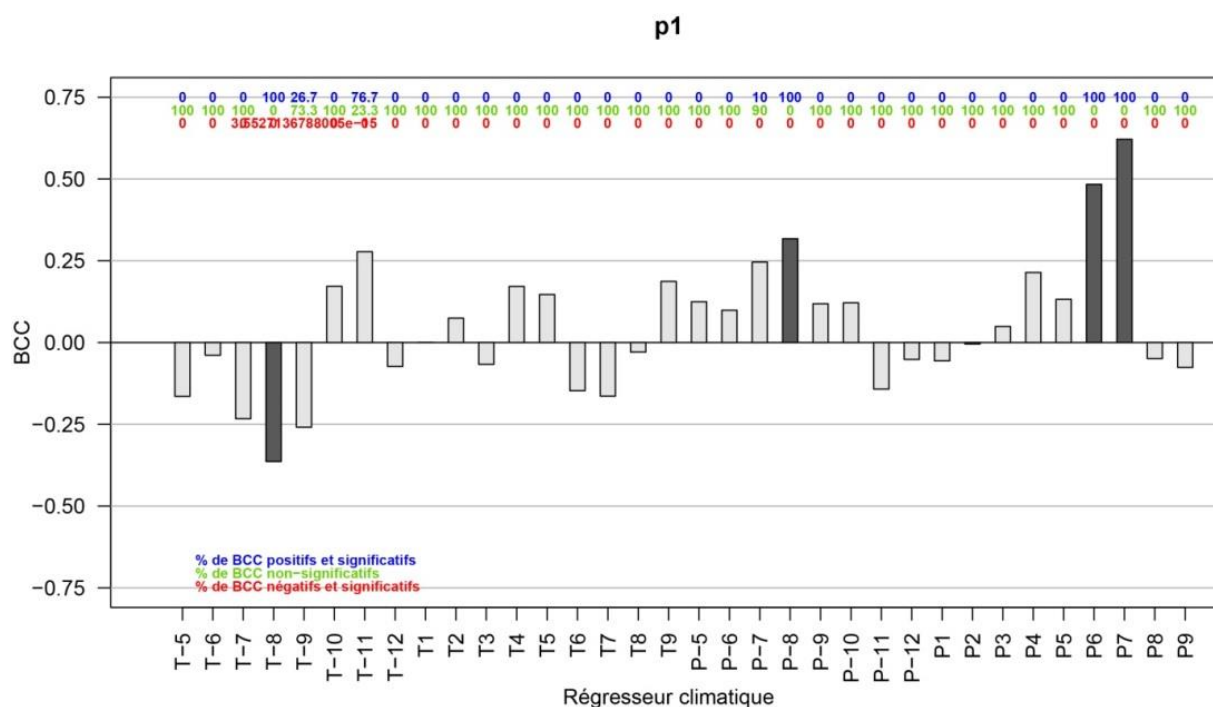


Figure 26 Fonction de réponse simple selon la routine de Mérian (2010)

Les fonctions de réponse mobile

Les fonctions de réponse mobiles montrent que le pin à crochets réagit aux précipitations et aux températures de l'année $n-1$ et n mais que cette réponse n'est pas constante et peut varier selon la période considérée.

Les fonctions de réponse mobiles révèlent ainsi une réponse positive, quasi-continue et significative des pins à crochets vis à vis des précipitations de juillet (n) sur l'ensemble de la période considérée (1801–2003) et atteignent leur maxima entre 1945 et 1995. Une réponse similaire est observée avec les précipitations de juin (n) depuis le milieu du XIX^e siècle (intervalle 1845–1894). Les relations avec les autres paramètres climatiques sont moins fortes et beaucoup moins durables. On remarque ainsi sur la figure 27 que les relations avec les précipitations printanières et estivales de l'année $n-1$ varient selon l'intervalle de temps considéré. Ainsi, une relation significative est observée avec les précipitations de mai ($n-1$) entre 1865 et 1965 et avec les précipitations de juillet entre 1845 et 1945 (coefficient de réponse compris entre 0,3 et 0,8).

Cette réponse aux précipitations de juillet (n-1) disparaît progressivement au milieu du XX^e siècle alors que les précipitations d'août (n-1) deviennent significatives à partir du début du XX^e siècle (1895 à 1985). Les autres variables pluviométriques, à l'exception des précipitations de septembre (n), négativement corrélées à la croissance radiale depuis les années 1930 (coefficient compris entre -0,2 et -0,4), ne montrent pas une réponse suffisamment continue pour être considérées comme significatives.

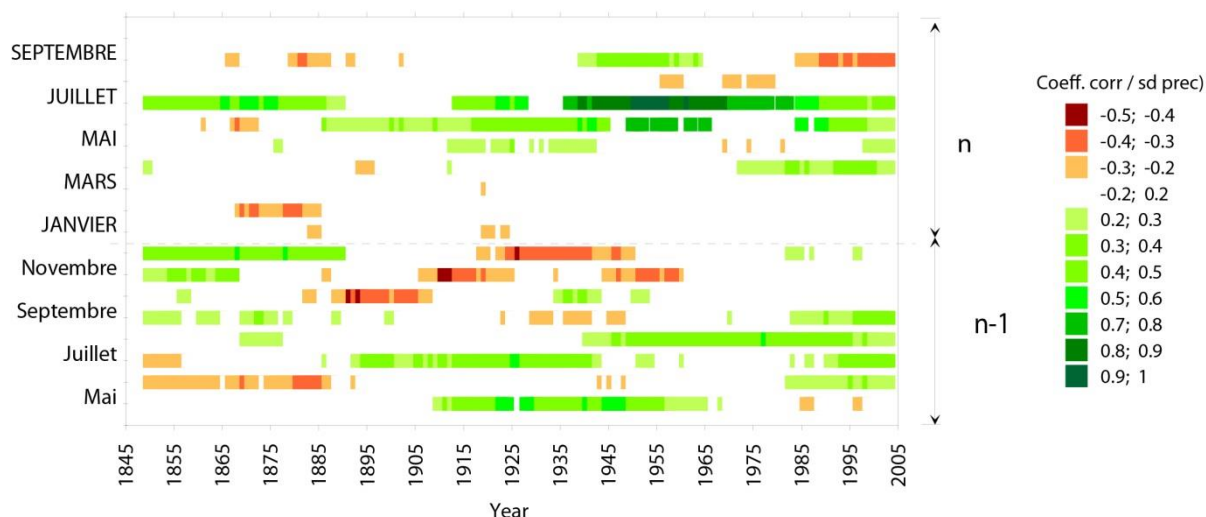


Figure 27 Fonction de réponse mobile du *Pinus uncinata* Mill. aux précipitations selon la routine de Mérian (2010)

La réponse de la croissance radiale aux températures moyennes mensuelles (Figure 28) est moins importante que celle observée pour les précipitations puisque les coefficients de réponse sont compris entre 0,7 et -0,7 (-0,5 et 1 pour les précipitations). Les réponses sont également très fluctuantes en fonction des périodes considérées. Au XIX^e siècle, la croissance est positivement corrélée aux températures d'août (n, coefficient de réponse compris entre 0,4 et 0,7) et aux températures de juin (n-1) (coefficient compris entre 0,2 et 0,4). De la même manière, une réponse négative de *Pinus uncinata* à l'égard des températures de juillet (n) est observée lorsque l'intervalle de calibration est compris entre 1865 et 1985. Récemment, des réponses positives aux intersaisons (printemps et automne) sont observées au cours des mois de mars et de septembre (n). Autrement dit, la croissance radiale du pin à crochets du massif du Vercors semble favorisée par des températures clémentes au début et à la fin de la période végétative.

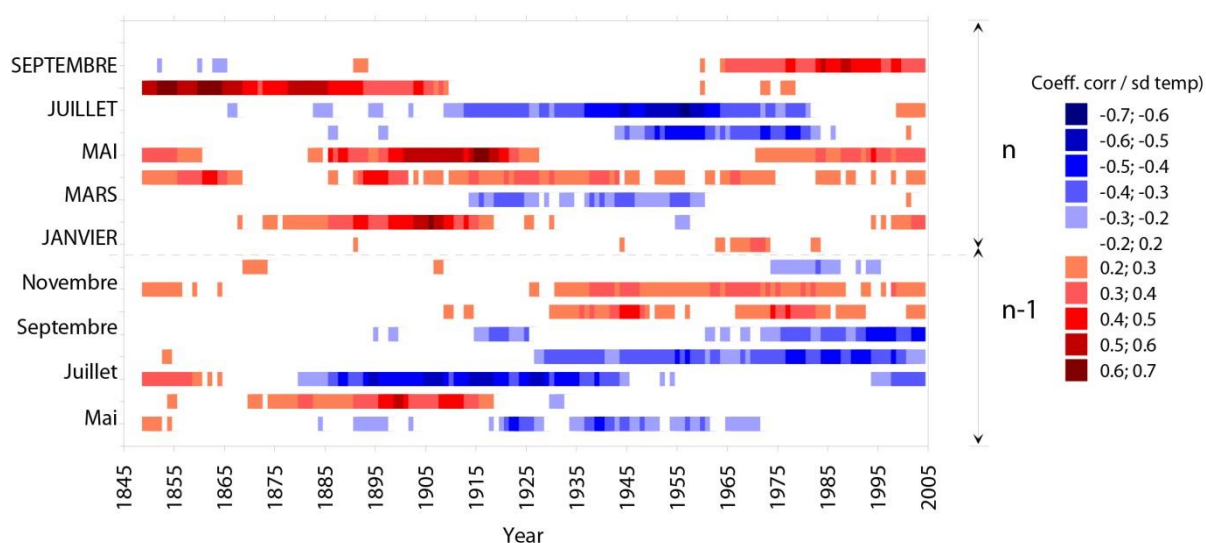


Figure 28 Fonction de réponse mobile du *Pinus uncinata* Mill. aux températures selon la routine de Mérian (2010)

IV. La reconstruction des paramètres de précipitation

La reconstruction des précipitations

La reconstruction climatique des précipitations des écarts à la moyenne de juin et juillet, est basée sur l'intervalle de temps compris entre 1920 et 1969. Car, lors d'une première reconstruction, il est constaté que les observations HISTALP et la reconstruction sont les plus similaires entre cette période (Figure 29).

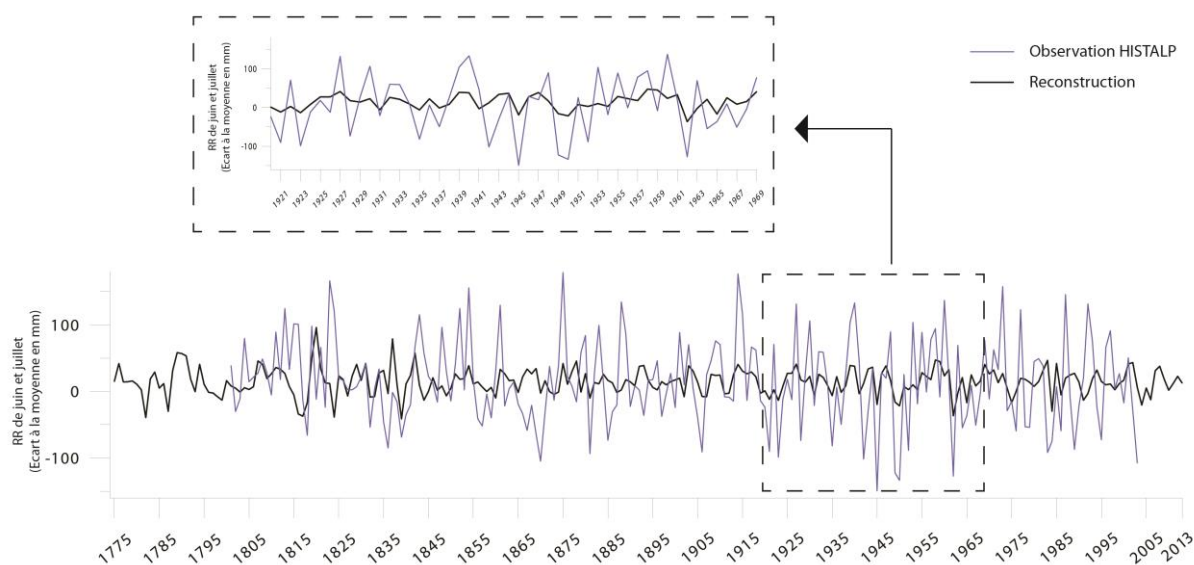


Figure 29 Première étape de la reconstruction climatique : identification d'une période de calibration/vérification

La validation de la reconstruction se fait en deux temps. Une validation croisée est d'abord obtenue en divisant l'intervalle de calibration en une période 1 (1920-1944) et une période 2 (1945-1969). On calibre sur la période 1 et on valide sur la période 2, puis inversement. La calibration sur la période 1 a donné un R^2 de 0,412 (significatif à $p < 0,001$), un RE de 0,415 et un CE de 0,408.

La calibration sur la période 2 a donné un R^2 de 0,468 (avec $p < 0,001$), un RE de 0,469 et un CE de 0,464. Le R^2 sur la totalité de la période de calibration (1920-1969) est de 0,445 (avec $p < 0,001$) avec un intervalle de confiance à 95% de 0,096 et à 99% de 0,169. (Figure 30). L'ensemble de ces indices statistiques confirment la robustesse de la reconstruction.

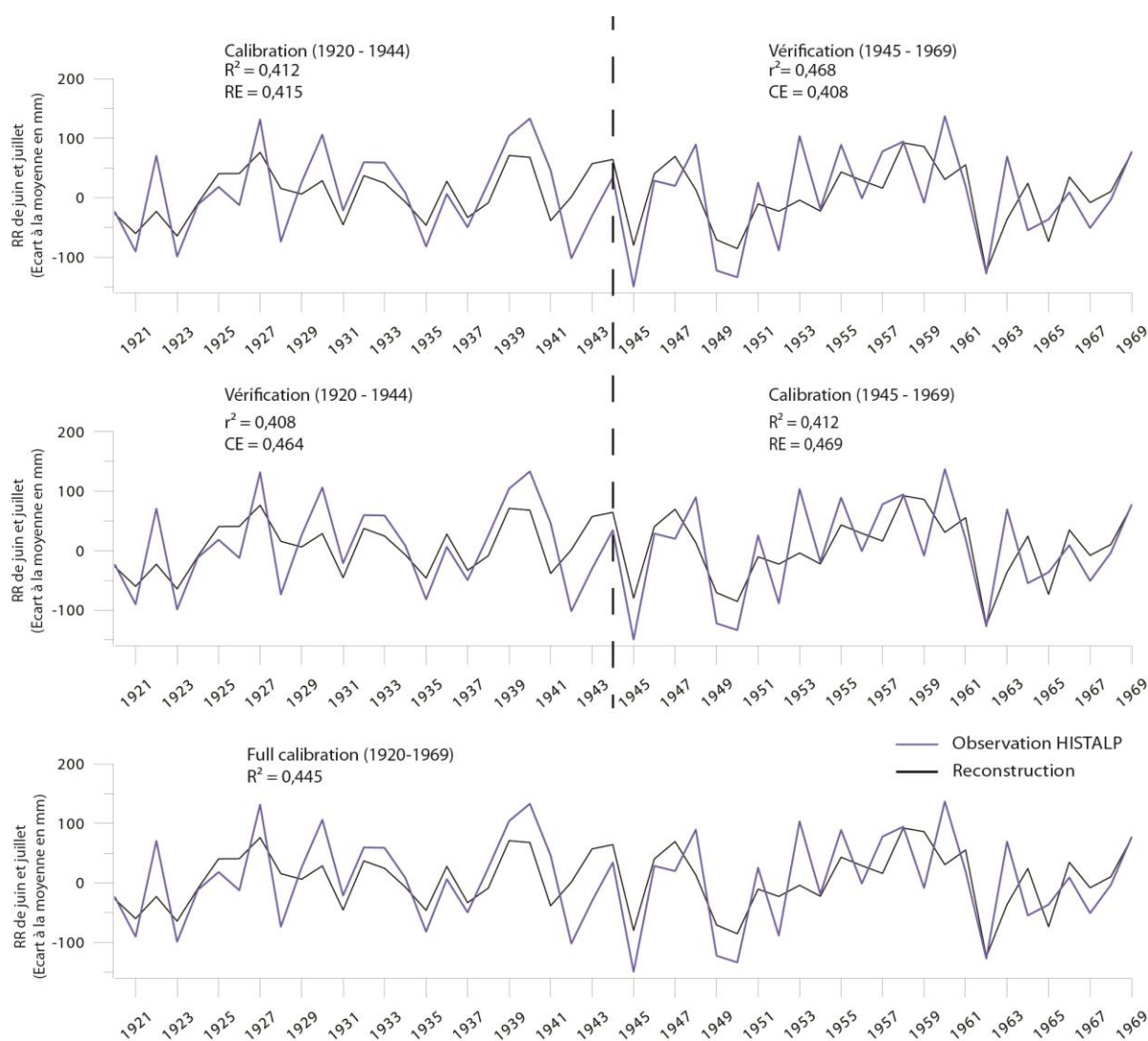


Figure 30 Chronologie des écarts à la moyenne des précipitations de juin et juillet observé et reconstruit pour la période 1920 – 1969 en vérification et calibration croisées

Le modèle de régression linéaire retenu pour la reconstruction est la suivante :

La reconstruction finale est obtenue « scaling » des données reconstruites (Figure 31). La moyenne et l'écart type de la reconstruction et des observations sont alors égaux.

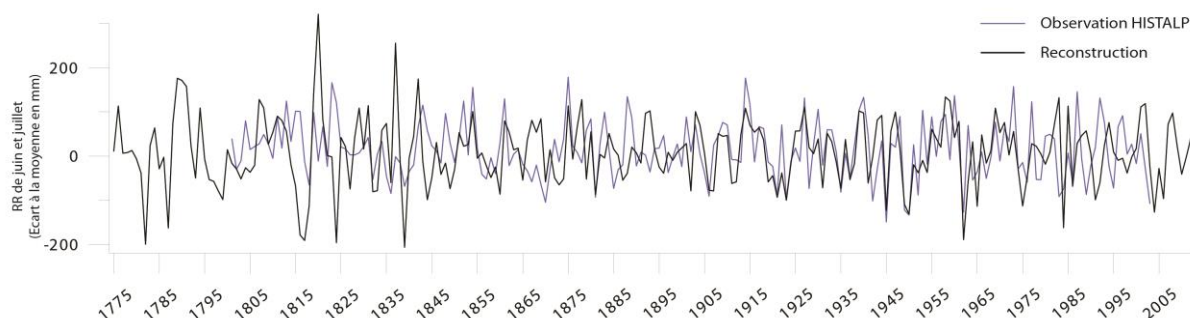


Figure 31 Reconstruction des écarts à la moyenne des précipitations de juin et juillet après la méthode de « scaling »

Le coefficient de détermination entre les données HISTALP et la **reconstruction finale** pour l'ensemble de la période couverte par les données instrumentales (1880-2003) **est égal à 0,2**. Il augmente à **0,33 lorsque l'on considère la période 1880-1980** afin de s'affranchir des problèmes de divergence (voir discussion) liés au réchauffement du climat depuis le milieu des années 80. Les coefficients de détermination entre la reconstruction et les séries climatiques d'Autrans (1905-2013) et de Villard-de-Lans (1960-2013) atteignent respectivement 0,12 et 0,14 (Tableau 7).

Sur la période 1980 et 2013, R^2 (0,03) n'est significatif pour aucune des deux stations. Il est en revanche **très significatif (0,49)** lorsque l'on compare la série de **précipitations reconstruite avec la pluviométrie à Villard-de-Lans** entre 1960 et 1980.

	HISTALP		Autrans		Villard-de-Lans	
	1880 - 2003	1880-1980	1905 - 2013		1960 - 2013	
Coefficient de détermination (R^2) issu de la corrélation avec les données de la reconstruction	0,2	0,33	0,12		0,14	
	1960-1980	1980-2003	1960-1980	1980-2013	1960- 1980	1980-2013
	0,3	<0	0,34	0,03	0,49	0,03

Tableau 7 Coefficient de détermination entre les trois stations météorologiques et la reconstruction

Identification des années de sécheresses et des années pluvieuses

La comparaison des précipitations reconstruites et observées (HISTALP) permet de valider la reconstruction. A cet effet, **les 5 années les plus sèches et les plus pluvieuses** de chaque série ont été isolées sur **la période 1880-1980**. Les cinq années les plus sèches de la reconstruction (1945, 1950, 1962, 1965, 1975) montrent ainsi un **déficit hydrique RR de -113 mm pour la reconstruction**.

Cette valeur est comparable pour les observations HISTALP, -102 mm (1942, 1945, 1949, 1950, 1962). Pour les années pluvieuses, l'excès de précipitations est de 133 mm pour la reconstruction (1914, 1927, 1958, 1959, 1969) et de 108 mm pour les observations (1888, 1914, 1940, 1960, 1973). Les années sèches communes aux deux séries données sont 1945, 1950 et 1962. Pour les années humides, seule 1914 est commune aux données météorologiques et reconstruites (Figure 32) 1880 à 1980).

La comparaison des deux séries (années colorées sur la figure) montre que les années sèches sont alignées sur la droite de régression ($y=x$) alors que les résidus sont beaucoup plus importants pour les années humides. Cette différence démontre que la reconstruction reproduit mieux le stress hydrique estival que les années caractérisées par des précipitations abondantes. Enfin, la prise en compte du seuil de sécheresse de la reconstruction à -113 millimètres pour la reconstruction met en avant 13 années particulièrement sèches de 1775 à 2013. (Figure 33 et tableau 8). Toutefois, il en est dénombré 7 à partir des années 1880, toutes regroupées entre les années 1945 à 2004 (1945, 1950, 1962, 1965, 1975, 1984 et 2004). L'année la plus sèche est 1962 avec un écart à la moyenne des précipitations de 189,49 mm.

Quatre de ces années apparaissent sèches dans les séries Histalp et Meteo-France. Ainsi, 1962 est une année qui apparaît particulièrement sèche dans les séries d'HISTALP (3ème position), d'Autrans (4ème position) et de Villard-de-Lans (4ème position). Il en est de même pour 1950 (2ème pour HISTALP et 10ème pour Autrans). L'été 2004 apparaît sec à Autrans (5ème position) et à Villard-de-Lans (1ère position), les données HISTALP n'étant pas disponibles pour cette année. Enfin, l'été 1945 est le plus de la série HISTALP depuis 1880 (les données sont indisponibles pour les stations locales).

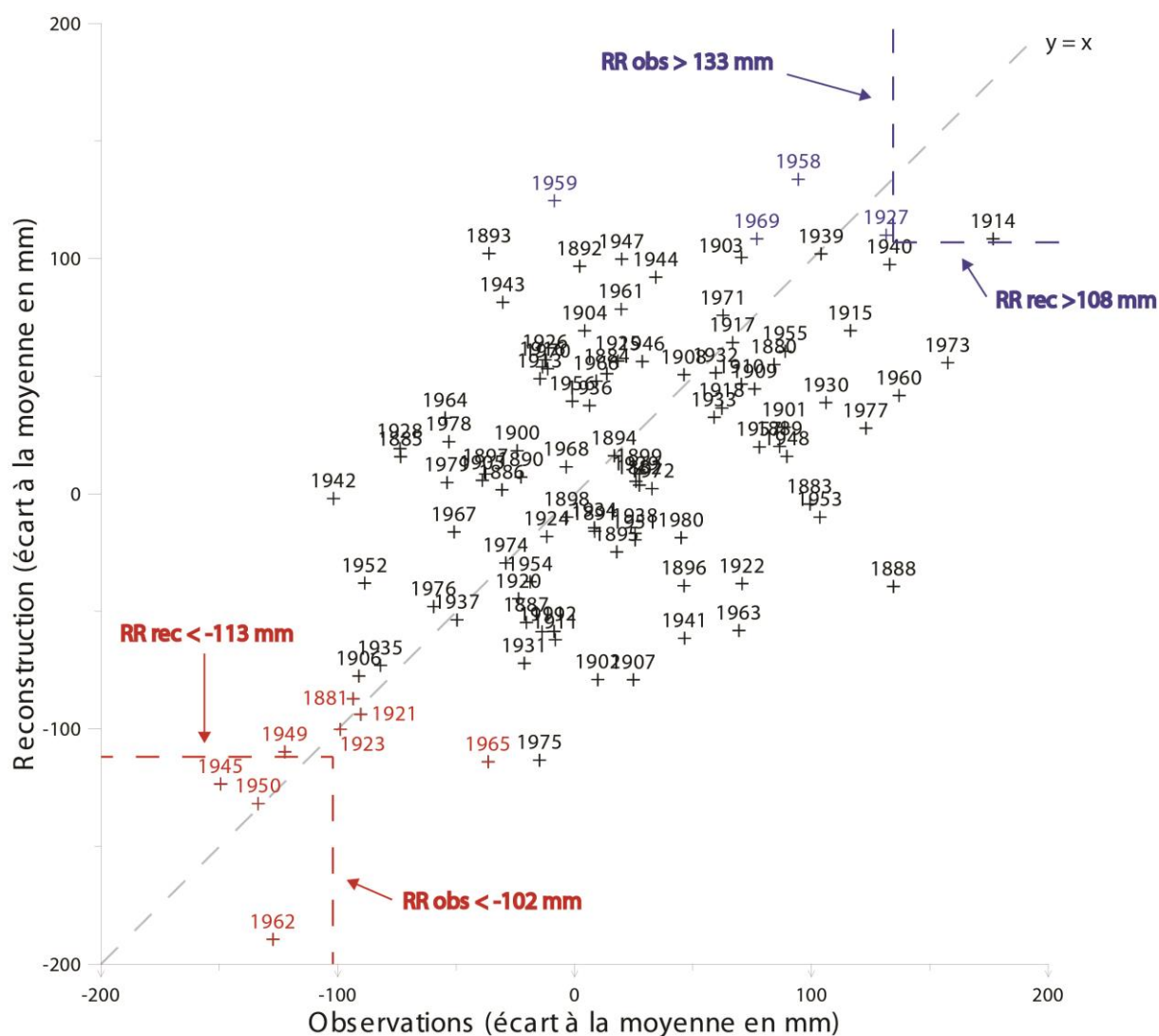


Figure 32 Représentation de la corrélation entre les données HISTALP et les données de la reconstruction. Identification des années de sécheresse (pointillés rouges)/des années pluvieuses (pointillés bleus) et des indices de croissance faibles (date en rouge)/des indices de croissance élevés (date en bleu)

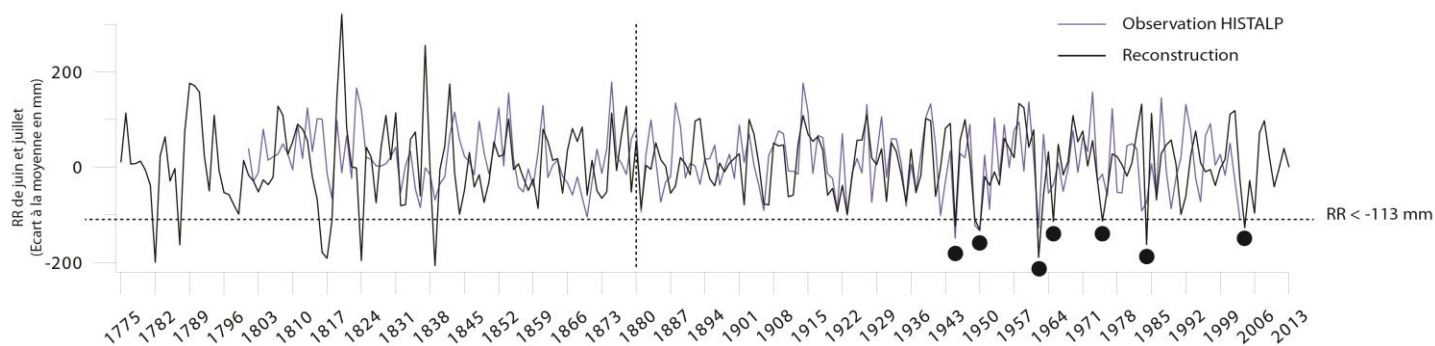


Figure 33 Reconstruction des écarts à la moyenne des précipitations de juin et juillet et identification des années sèches (rond noir) de la reconstruction à partir des années 1880 (barre verticale en pointillée)

	Reconstruction		HISTALP (1801-2003)		Autrans (1905-2013)		Villard-de-Lans (1960-2013)	
Années sèches	Ecart à la moyenne des RR (mm)	Classement	Ecart à la moyenne des RR (mm)	Classement	Ecart à la moyenne des RR (mm)	Classement	Ecart à la moyenne des RR (mm)	Classement
1962	-189,49	1	-127,37	3	-143,50	4	-68,53	4
1984	-162,54	2	-74,654	17	-99,40	11	-25,18	16
1950	-131,78	3	-133,623	2	-111,80	10	NaN	NaN
2004	-127,30	4	NaN	NaN	-139,60	5	-73,83	1
1945	-123,43	5	-149,463	1	NaN	NaN	NaN	NaN
1965	-113,98	6	-36,51	39	-91,00	13	-32,68	11
1975	-113,29	7	-14,803	66	-7,30	38	-12,13	22

Tableau 8 Récapitulatifs des années sèches de la reconstruction et leur classement dans les trois stations météorologiques

Discussion

La première reconstruction des précipitations estivales à l'échelle du Massif du Vercors et des Alpes

Dans cette étude, le pin à crochet a été choisi en raison de sa [capacité à réagir aux fluctuations des précipitations](#) (Petitcolas., 1998). Notre étude [confirme la sensibilité de l'espèce au stress hydrique](#) estival. Le choix d'échantillonner des arbres dans le massif du Vercors et sur lapiez renforce cet impact des précipitations qui constituent un facteur très limitant pour la croissance radiale de l'espèce. Cette sensibilité des populations de *Pinus uncinata* Mill. échantillonnées sur substrat calcaire lapiazé aux précipitations de juin et juillet a rendu possible la reconstruction des précipitations estivales. Cette reconstruction est la première reconstruction de précipitation à l'échelle du massif du Vercors et des Alpes Françaises. Les autres reconstructions issues d'une approche dendroclimatologique concernent les températures et proviennent pour la plupart de mélèzes et de pins cembro échantillonnés à plus haute altitude (>2000 m) au niveau de la limite supraforestière (Corona et al, 2010., Dorado Linan et al., Corona et al., 2010, Morellon et al., 2012, A.Coppola et al., 2013).

[Les écarts à la moyenne des précipitations estivales de juin et juillet ont été reconstruits sur la période de 1775 – 2013 soit 238 ans.](#) Les tests statistiques (r^2 , RE et CE) réalisés sur les périodes de calibration (1920–1944) et de vérification (1945–1969) sont significatifs et attestent de la robustesse de la reconstruction. Les précipitations estivales expliquent à 45% la formation du cerne de croissance. Les valeurs de RE et CE, tous deux supérieurs à 0, indiquent que la reconstruction est robuste. Cependant, la calibration / validation limitée à la période 1920–1969 démontre que la modélisation réalisée est [très sensible aux années incluses dans le modèle de régression](#).

La comparaison de la reconstruction et des observations instrumentales pour les années caractéristiques à croissances fortes et faibles, montre que la [modélisation reproduit plus fidèlement les années extrêmement sèches que les années extrêmement humides](#). Ce phénomène est expliqué par la notion de « facteur limitant » puisque l'arbre ne peut pas croître plus que le permet le facteur limitant (Fritts, 1976). A l'inverse, lorsque les précipitations sont suffisantes, l'arbre va utiliser seulement les ressources nécessaires pour sa croissance. En effet, un végétal ne possède pas une croissance exponentielle. Il ne va donc pas se développer proportionnellement aux ressources disponibles.

Avant 1880...

La reconstruction dendrochronologique à l'échelle du Massif du Vercors est basée sur les séries moyennes de largeurs de cernes de 67 individus échantillonnés selon un axe nord/sud. Seuls les individus présentant un coefficient de corrélation égal ou supérieur à 0,7 avec la chronologie de référence ont été retenus. Cette chronologie débute en 1775 et se termine en 2013. En raison du [nombre insuffisant d'échantillons](#) entre 1775 et 1879, la chronologie de référence ne peut être considérée comme réellement fiable qu'entre 1880 à 2013. Cette faible réplification avant 1880 influence directement la reconstruction des précipitations dans le massif. Les fluctuations des écarts à la moyenne des précipitations avant 1880 sont basées sur les indices de croissance regroupant

moins de 20 individus. D'un point de vue statistique, ce nombre d'échantillon est trop faible pour permettre une reconstruction robuste.

La [qualité des données météorologiques](#) influence également reconstruction. Bien que les données pluviométriques de HISTALP, d'Autrans et de Villard-de-Lans soient significativement corrélées, il peut [exister des dérives ou des biais](#) dans les séries les plus anciennes, notamment.

Ces biais peuvent être liés au [déplacement ou à la fermeture](#) des stations météorologiques comme cela fut le cas pour la station d'Autrans qui a été déplacée en 1938. De plus, en raison de leur emplacement géographique les stations météo France (Villard-de-Lans et d'Autrans) ne sont [pas représentatives des paramètres climatiques](#) que subissent les peuplements de pin à crochets en [hautes altitudes](#) (Böhm et al., 2001). Il existe de grandes disparités entre les climats locaux et régionaux. Les contrastes topographiques sont par exemple à l'origine de différents topoclimats et donc de l'émergence de climats locaux (Beniston, 2006) différents du climat représenté par le point de grille Histalp utilisé pour la reconstruction.

L'enregistrement instrumental des températures a débuté dans les Alpes dans les années 1760. Avant les années 1850-1870, il a été par exemple démontré que les thermomètres étaient insuffisamment protégés du rayonnement solaire et que cette protection insuffisante était à l'origine d'une dérive de l'ordre de 0.4°C pour les températures estivales (Böhm et al., 2009). Aucune étude similaire n'est disponible, à notre connaissance, pour les précipitations mais l'on peut envisager que [l'absence de protocole de mesure standard avant 1870 puisse également être à l'origine de dérive](#) dans les séries pluviométriques. En outre, des difficultés additionnelles concernant les relevés pluviométriques proviennent de l'orographie des sites et de la prise en compte complexe des précipitations solides (Bigot et Rome, 2010).

Le point de grille de la base de données HISTALP qui a été utilisé pour la reconstruction résulte d'une interpolation à partir des stations météorologiques disponibles pour le massif du Vercors. La qualité et la robustesse des données utilisées [dépendent donc du nombre de stations météorologiques disponibles dans le secteur d'étude](#). A l'échelle de l'arc alpin, la base de données HISTALP repose ainsi sur 192 séries pluviométriques homogénéisées. AU XIX^e siècle, la densité du réseau météorologique est en revanche beaucoup plus faible puisque en 1800, la base de données est constituée de 5 stations. Progressivement ce nombre augmente à 56 en 1859, 122 en 1879 et 192 stations en 1927 (Efthymiadis et al., 2006). (Figure 34) On peut cependant émettre l'hypothèse que les asynchronismes observés avant 1880 sont liés en grande partie à la qualité des observations instrumentales de la base de données HISTALP, le point de grille utilisée résultant de l'interpolation de stations situées en périphérie du massif et de qualité probablement faible.

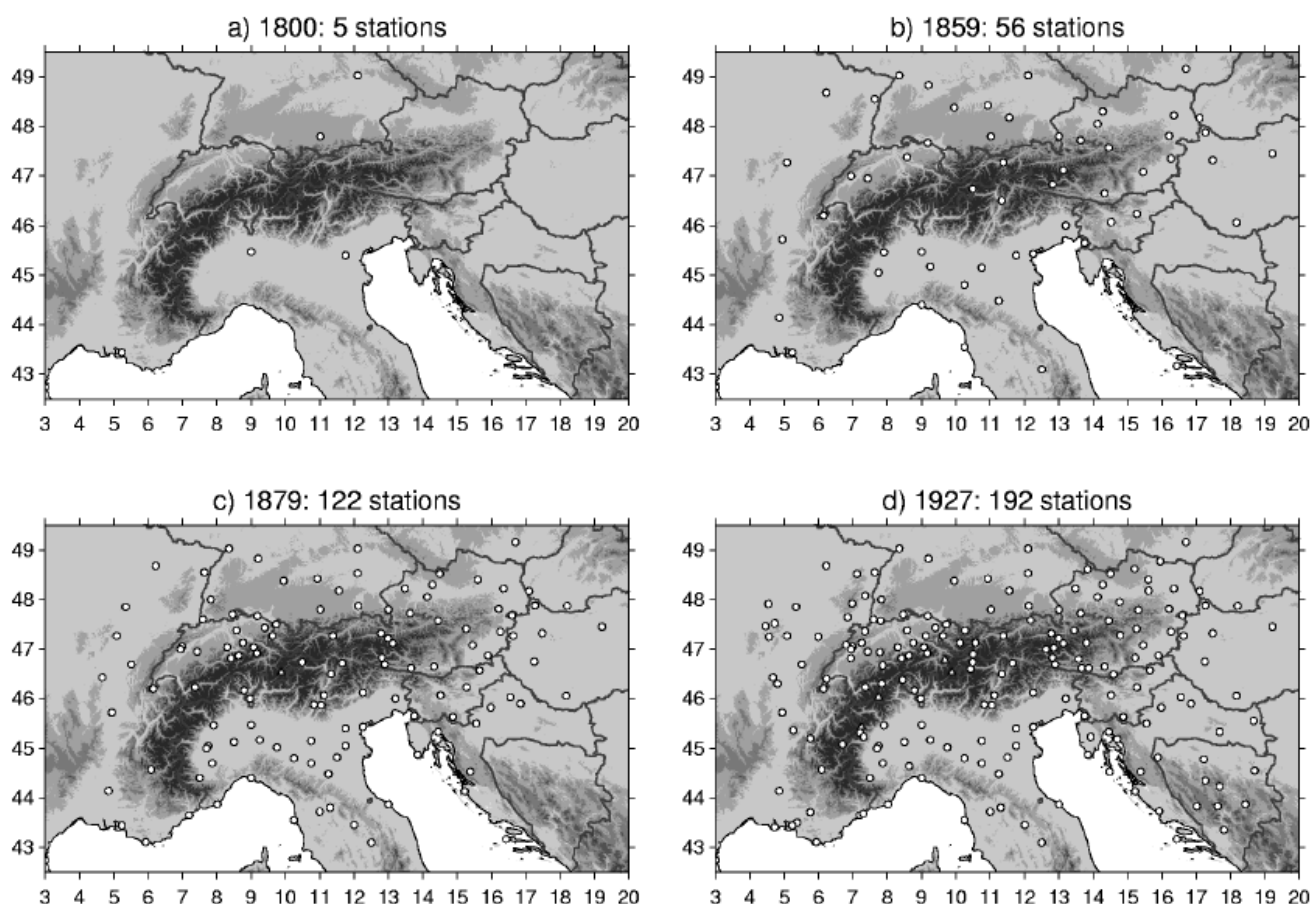


Figure 34 Localisation géographique des stations météorologiques permettant la création de la base de données HISTALP depuis 1800 à 2003, Efthymiadis et al., 2006

... Après 1980

On constate de nouveau une [corrélation faible entre la reconstruction et les séries météo France et HISTALP](#). Dans ce cas, la qualité des données et la densité du réseau d'observation ne peuvent pas expliquer les différences. [L'hypothèse d'une divergence](#) (D'Arrigo et al., 2007) entre les données météorologiques et les chronologies de largeurs de cernes est alors retenue. Cette divergence remet en cause le « principe d'uniformité » c'est-à-dire la stabilité de la réponse des arbres aux fluctuations interannuelles du climat. Dans les hautes latitudes de l'hémisphère Nord, plusieurs auteurs ont démontré une diminution de la sensibilité des arbres aux températures de la période végétative (Jacoby and D'Arrigo, 1995; Briffa et al., 1998 ; Büntgen et al., 2006 ; D'Arrigo et al., 2007). Cette perte de sensibilité se traduit par une diminution des corrélations entre les chronologies de largeur de cernes et les températures de mai à septembre depuis le milieu des années 1980. Ainsi, dans la première étude consacrée à la divergence, Jacoby et D'Arrigo (1993), ont démontré qu'un peuplement du nord de l'Alaska voyait son signal de température diminuer au cours des dernières décennies. Ils ont également démontré que l'augmentation des températures liée au réchauffement du climat était à l'origine d'une diminution de la sensibilité au stress thermique et d'une augmentation de la réponse au stress hydrique (D'Arrigo et al., 2007).

De ce fait, d'un point de vue dendroclimatologique, la divergence est à l'origine d'une surestimation des températures au cours des dernière décennie (Briffa et al., 1998). La reconstruction des précipitations du massif du Vercors montre une diminution des synchronismes entre la chronologie de largeur de cernes et les données météorologiques à partir des années 1980. Le « problème de divergence » est habituellement identifié pour le signal thermique. Par analogie avec les observations réalisées aux hautes latitudes, nous émettons l'hypothèse d'une divergence dans le massif du Vercors : *Pinus uncinata* Mill. [habituellement sensible aux précipitations \(n\) semble ainsi devenir de plus en plus sensible aux températures en raison du réchauffement climatique récent](#). Cette évolution se traduit également par une diminution de la robustesse du signal de précipitation dans les séries dendrochronologiques. Cette hypothèse est corroborée par les fonctions de réponses mobiles. A partir des années 1980, la réponse de l'arbre aux précipitations diminue pour les mois de juillet (n). Or, il y a un signal plus long dans l'année mais moins intense pendant la période végétative du pin (n-1 et n). En parallèle, depuis 1975, on observe une réponse accrue des individus aux températures d'août (n-1) et septembre (n-1).

L'hypothèse d'une divergence dans le massif du Vercors est également soutenue par les observations météorologiques. Dans le massif du Vercors et de la Chartreuse, il est observé sur la période 1959–2009, une augmentation des températures de 0,014°C/an avec des hivers beaucoup plus doux (Bigot et Rome, 2010). Durand et al., (2009) observent ainsi une tendance pluviométrique à la hausse dans les Alpes du Nord depuis 1958 d'environ 12mm/an surtout pour les massifs à une altitude comprise entre 1 500 et 2 000 mètres. [Cette augmentation de la pluviométrie et des températures pourrait modifier l'écophysiologie du pin à crochets et être à l'origine d'une sensibilité accrue des individus à l'égard des températures](#).

Conclusion et perspectives

Rappel des objectifs et méthodes utilisées pour y parvenir

L'objectif de ce projet CERNES était de qualifier le *Pinus uncinata* Mill. comme bio indicateur du climat et d'identifier quel était son facteur limitant afin d'établir une modélisation des précipitations dans le massif du Vercors. Pour y parvenir, il a été prélevé 300 échantillons dont 67 individus retenus sur l'ensemble du massif.

La méthodologie employée repose sur les routines R que Mérian (2010) a mis en place. Le potentiel de croissance du pin à crochet sur ce massif a été recherché à travers l'étude de la croissance radiale annuelle. L'influence des variations inter et intra annuelles du climat sur cette croissance a été étudiée par la recherche des années caractéristiques du peuplement et par la méthode de fonction de réponse simple et mobile. Ensuite, la reconstruction climatique est directement inspirée des résultats obtenus précédemment.

Les influences du climat sur la croissance du Pinus uncinata Mill.

L'étude des relations cernes/climats par la méthode des fonctions de réponse a relevé un comportement influencé par des conditions météorologiques de l'année $n-1$ et n dans le temps. Le pin à crochets est apparu très sensible aux précipitations de juin et juillet (n) et des températures du mois d'août ($n-1$). Avec une forte relation pour ce premier dans les années 1920 – 1960.

À l'intérieur du massif du Vercors, il est apparu que cette espèce a une réponse homogène spatiale face au climat et cela, malgré un axe Nord/Sud et des influences climatiques multiples. Elle serait liée à une augmentation des températures ou une augmentation des sécheresses dans le temps (Mérian, 2012).

Modélisation des écarts à la moyenne des précipitations de juin et juillet

La reconstruction s'est basée sur ces résultats intra et inter annuelle et nous a permis d'établir une modélisation des écarts à la moyenne de la pluviométrie de juin et juillet sur une durée de 1775 à 2013. Les indices de croissance radiale du pin à crochets sont expliqués à 46% par la pluviométrie. En effet, ils sont aussi influencés par les conditions climatiques de l'année $n-1$ notamment par les températures du mois d'août.

Avant les années 1880, il y a peu d'individus et les données météorologiques de HISTALP sont fondées sur des données instrumentales de base possédant des lacunes. La reconstruction n'est alors pas considérée comme robuste.

Après les années 1980, il est observé « le phénomène de divergence » qui explique normalement une modification des facteurs limitants des températures vers les précipitations. Ici, le *Pinus uncinata* Mill. est de plus en plus sensible au stress thermique. Les indices de cernes ne sont plus seulement influencés par les précipitations mais aussi par les températures.

De manière générale, il est constaté que la reconstruction a plus de facilité à modéliser les extrêmes secs que les extrêmes pluvieux car en ce qui concerne les années sèches le cerne est limité par un facteur limitant, alors que lorsque les précipitations sont abondantes plusieurs facteurs intrinsèques et extrinsèques peuvent expliquer la croissance radiale du végétal.

Le facteur limitant ou les facteurs limitants du *Pinus uncinata* Mill.

Nous avons constaté que l'eau comme facteur limitant est en train d'être modifié. Aujourd'hui est une période charnière pour cette espèce. Notre hypothèse repose sur la mise en place des températures comme facteur limitant. Toutefois, il serait intéressant de mener dans une dizaine d'années une nouvelle étude sur l'évolution du pin à crochet sur le massif du Vercors afin de confirmer ou non cette hypothèse.

Hypothèse d'évolution de la forêt de pin à crochets dans le massif du Vercors

De par le phénomène de divergence, l'avenir du pin à crochet semble influencé par l'augmentation des températures dans le massif. Selon l'étude de Petitcolas en 1998, le pin à crochet ne semble pas être sensiblement marqué aux chaleurs estivales, or aujourd'hui nous constatons l'inverse. De plus, le pin à crochets se retrouve très souvent en zone de combat avec l'épicéa, nous pouvons émettre l'hypothèse qu'avec le réchauffement climatique, le *Picea abies* (L.) peut élargir son aire altitudinale de répartition et entraîner une concurrence future entre ces deux espèces. Le *Pinus uncinata* Mill. pourrait être amené à disparaître.

Bibliographie

- Bigot S., Rome S., 2010. Contraintes climatiques dans les Préalpes françaises : évolution récente et conséquences potentielles futures. *EchoGéo*. 21p. DOI : 10.4000/echogeo.12160
- Böhm R., Jones PD., Hiebl J., Frank D., Brunetti M., Maugeri M., 2009. The early instrumental warm-bias : a solution for long central European temperatures series 1760–2007. *Climatic Change*. DOI 10.1007/s10584-009-9649-4
- Briffa, K., Schweingruber, F., Jones, P., Osborn, T., 1998. Reduced sensitivity of recent tree growth to temperature at high northern latitudes. *Nature* 391. pp. 678–682.
- Büntgen U., Frank DC., Nievergelt D., Esper J., 2006. Summer Temperature variations in the European Alps, A.D. 755–2004. *Journal of climate*, volume 19. pp. 5606 –5623
- Büntgen U., Esper J., Frank DC., 2005. A 1052-year tree-ring proxy for Alpine summer temperatures. *Climate Dynamics*, 25, pp. 141–153. DOI 10.1007/s00382-005-0028-1
- CERNES : Caractérisation dendrochronologique des forêts de pins à crochets (*Pinus uncinata* Mill. Ex. Mirb.) de la Réserve Naturelle des Hauts-Plateaux du Vercors. 2013. Dossier de candidature « Pôle départementale de recherches sur la biodiversité en Isère. IRSTEA, unité Ecosystèmes Montagnard
- Classeur ressources parc du Vercors. 2007. La formation des paysages. pp. 5–8
- Coppola A., Leonelli G., Salvatore MC., Pelfini M., Baroni C., 2013. Tree-ring-based summer mean temperature variations in the Adamello-Presanella Group (Italian Central Alps), 1610–2008 AD. *Climate of the past* 9 : pp. 211–221. DOI : 10.5194/cp-9-211-2013
- Corona C., Guiot J., Edouard JL., Chalié F., Büntgen U., Nola P., Urbinati C. 2010. Millennium-long summer temperature variations in the European Alps as reconstructed from tree rings. *Climate of the Past* 6: pp. 379–400. DOI : 10.5194/cp-6-379-2010
- Corona C., Edouard JL., Guibal F., Guiot J., Bernard S., Thomas A., Denelle N., ????. Reconstruction des températures estivales dans les Alpes françaises au moyen de données dendrochronologiques (749–2008 AD), Collection EDYTEM. Numéro 11. Panorama de la dendrochronologie en France : actes du colloque "Panorama de la dendrochronologie en France" 8, 9 et 10 octobre 2009, Digne-les-Bains, Alpes de Haute Provence. 69–76
- D'Arrigo R., Wilson R., Liepert B., Cherubini P., 2007. On the 'Divergence Problem' in Northern Forests: a review of the tree-ring evidence and possible causes. *Global and Planetary Change* 60. pp. 289–305. DOI : 10.1016/j.gloplacha.2007.03.004
- Dorado Linan I., Gutierrez E., Heinrich I., Andreu-Hayles L., Muntan E., Campelo F., Helle G., 2011. Age effects and climate response in trees: a multi-proxy tree-ring test in old-growth life stages. *Eur J Forest Res* 131: 933–944. DOI : 10.1007/s10342-011-0566-5

- Efthymiadis D., Jones PD., Briffa KR., 2006. Construction of a 10-min-gridded precipitation data set for the Greater Alpine Région for 1800–2003. *Journal of Geophysical Research*, 110. DOI : 10.1029/2005JD006120
- Joly D., Brossard T., Cardot H., Cavailhes J., Hilal M., Wavresky P., 2010. « Les types de climats en France, une construction spatiale », *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Cartographie, Imagerie, SIG, document 501, mis en ligne le 18 juin 2010, consulté le 11 août 2014. URL : <http://cybergeo.revues.org/23155> ; DOI : 10.4000/cybergeo.23155
- Jourez B., 1997. Le bois de tension. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* pp. 100–112
- Lambert G., Lavier C., Perrier P., Vincenot S., 1988. Pratique de la dendrochronologie. *Histoire & Mesure*. III-3, pp. 279–308
- Lebourgeois F., Mérian P., 2012. Principes et méthodes de la dendrochronologie. Document de cours AgroParisTech – ENGREF. 85 p
- Lebourgeois F., Mérian P., 2011. La sensibilité au climat des arbres forestiers a-t-elle changé au cours du 20ème siècle ? *Revue forestière française*, volume 63, n°1, pp. 17–32
- Liu Y., Bao G., Song H., Cai Q., Sun J., 2009. Precipitation reconstruction from Hailar pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) tree rings in the Hailar region, Inner Mongolia, China back to 1865 AD. *Palaogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, volume 282, issues 1–4. pp 81–87. DOI : 10.1016/j.palaeo.2009.08.012
- Lopez-Saez J., 2011. Reconstruction de l'activité des glissements de terrain au moyen d'une approche dendrogéomorphologique. Thèse doc. Université Joseph Fourier – Grenoble I. 373p
- Mérian P., 2012. POINTER and DENDRO—Two applications under R software for analyzing tree response to climate using dendroecological approach. *Revue Forestière Française* 64(6): pp. 789–798
- Mérian P., 2012. Notice d'utilisation de l'application DENDRO. Version 4.0. 19p
- Mérian P., 2012. Notice d'utilisation de l'application CLIMAT. Version 4.0. 10p
- Mérian P., 2012. Notice d'utilisation de l'application POINTER. Version 4.0. 6p
- Morellon M., Pérez-Sanz A., Corella JP., Büntgen U., Catalàn J., Gonzalez-Samperiz P., Gonzalez-Trueba JJ., Lopez-saez J., Moreno A., Pla-Rabes S., Saz-Sanchez MA., Scussolini P., Serrano E., Steinhilber F., Stefanova V., Vegas-Vilarrubia T., Valeor-Garces B., 2012. A multi-proxy perspective on millennium-long climate variability in the southern Pyrenees. *Climate of the past* 8: pp. 683–700. DOI : 10.5194/cp-8-683-2012
- Mullenbach P., 2000. Reboisement d'altitude. Cemagref Edition. pp. 96–99
- Parc Naturel Régional du Vercors., Réserve Naturelle des Hauts Plateaux du Vercors, 2010. Etats des lieux de la réserve nationale des hauts plateaux du Vercors, document principal, Extrait du plan de gestion 2010–2019. pp. 6–63

Payette S., Filion L., 2010. Principes, méthodes et applications, la dendroécologie. Presses de l'Université Laval. 758p

Petitcolas V., 1998. Dendroécologie compare de l'épicéa, du mélèze, du pin cembro et du pin à crochets en limite supérieur de la forêt dans les Alpes françaises : influence de la variabilité macro-écologique. Thèse doc. Université Joseph Fourier – Grenoble I. 188p

Rolland R., Florence-Schuller J., Cooper J., 1995. Croissance comparée du pin à crochets et de l'épicéa (*Pinus uncinata* Ram. et *Picea abies* Karst.) sur dalle calcaire karstifiée en moyenne montagne tempérée (Vercors, France). *Revue de géographie alpine*, volume 83, N°1. pp. 17-32. DOI : 10.3406/rga.1995.3788

Saulnier M., Edouard J.L., Corona C., Guibal F., 2009. Etude de la relation entre la croissance du pin cembro et le climat dans les Alpes Françaises depuis 500 ans, Collection EDYTEM. Numéro 11. *Panorama de la dendrochronologie en France : actes du colloque "Panorama de la dendrochronologie en France"* 8, 9 et 10 octobre 2009, Digne-les-Bains, Alpes de Haute Provence. pp. 77-86

Touchan R., Meko D.M., Aloui A., 2008. Precipitation reconstruction for Northwestern Tunisia from tree rings. *Journal of Arid Environments*, volume 72, issues 10. pp. 1887-1896. DOI : 10.1016/j.jaridenv.2008.05.010

Tables des illustrations

Figure 1 Cerne de croissance du <i>Pinus uncinata</i> Mill.....	7
Figure 2 Substitution de contraintes climatiques sur la croissance radiale le long d'un double gradient de baisse des températures et de hausse des précipitations (gradient latitudinal ou altitudinal) (Mérian, 2012).....	10
Figure 3 La démarche méthodique développée dans ce mémoire	12
Figure 4 Localisation géographique du massif du Vercors	14
Figure 5 Localisation géographique des stations météorologique présentes sur le massif du Vercors	15
Figure 6 Schéma synthétique de l'espace des climats (Joly et al., 2010).....	15
Figure 7 Formation géologique de type lapiaz avec la présence de <i>Pinus uncinata</i> Mill.....	16
Figure 8 Aire de répartition du pin à crochets selon l'Atlas Florae Europae	19
Figure 9 Localisation géographique des placettes d'échantillonnage du pin à crochets.....	20
Figure 10 Localisation des stations HISTALP sur le Massif du Vercors	21
Figure 11 Données pluviométriques d'avril à septembre des trois stations météorologiques.....	23
Figure 12 La démarche méthodique développée dans ce mémoire	24
Figure 13 Echantillonnage avec une tarière de Pressler	24
Figure 14 Carottes collées sur une planche à bois préalablement rainurée.....	25
Figure 15 Pointage d'une carotte (âgé de 113 ans).....	25
Figure 16 Pointage des cernes sur coorecorder	26
Figure 17 Nombre d'arbres présent pour chaque année sur l'ensemble du massif du Vercors.....	27
Figure 18 Chronologie de référence non standardisée de la Grande Placette et le nombre d'arbre présent pour chaque année sur l'ensemble su massif du Vercors	28
Figure 19 La démarche méthodique développée dans ce mémoire	29
Figure 18 Double standardisation, la première de nature droite et la seconde de nature spline.....	31
Figure 21 La démarche méthodique développée dans ce mémoire	34
Figure 22 Corrélation chocolat entre chaque placette	35
Figure 23 Standardisation simple de type exponentielle (orange) et de type spline (vert). Standardisation double (violet)	35
Figure 24 Chronologie de la Grande Placette après une double standardisation et le nombre d'arbre présent selon les années sur l'ensemble du massif du Vercors	36
Figure 25 Années caractéristiques depuis les années 1880 suivant la méthode Pointer Year de Mérian (2010)	37
Figure 26 Fonction de réponse simple selon la routine de Mérian (2010).....	38
Figure 27 Fonction de réponse mobile du <i>Pinus uncinata</i> Mill. aux précipitations selon la routine de Mérian (2010)	39
Figure 28 Fonction de réponse mobile du <i>Pinus uncinata</i> Mill. aux températures selon la routine de Mérian (2010)	40

Figure 29 Première étape de la reconstruction climatique : identification d'une période de calibration/vérification	40
Figure 30 Chronologie des écarts à la moyenne des précipitations de juin et juillet observé et reconstruit pour la période 1920 – 1969 en vérification et calibration croisées	41
Figure 31 Reconstruction des écarts à la moyenne des précipitations de juin et juillet après la méthode de « scaling »	42
Figure 32 Représentation de la corrélation entre les données HISTALP et les données de la reconstruction. Identification des années de sécheresse (pointillés rouges)/des années pluvieuses (pointillés bleus) et des indices de croissance faibles (date en rouge)/des indices de croissance élevés (date en bleu)	44
Figure 33 Reconstruction des écarts à la moyenne des précipitations de juin et juillet et identification des années sèches (rond noir) de la reconstruction à partir des années 1880 (barre verticale en pointillée)	44
Figure 34 Localisation géographique des stations météorologiques permettant la création de la base de données HISTALP depuis 1800 à 2003, Efthymiadis et al., 2006.....	48
Figure 35 Localisation des 38 chronologies de cernes de croissance dans les Alpes Européennes pour le Pinus cembre et le Larix decidua (Corona et al., 2010).....	60

Tables des tableaux

Tableau 1 Les différentes disciplines issues de la dendrochronologie (d'après Lebourgeois et Mérian, 2012)	9
Tableau 2 Principales reconstructions dendroclimatologiques récentes dans les Alpes Européennes et les Pyrénées.....	11
Tableau 3 Fiche d'identité de l'espèce choisie pour l'étude (le Pinus uncinata Mill.)	18
Tableau 4 Fiche récapitulative de la station météorologique de Villard-de-Lans.....	22
Tableau 5 Fiche récapitulative de la station météorologique d'Autrans.....	23
Tableau 6 Identification des 11 placettes selon un axe Nord (haut du tableau) / Sud (bas du tableau)	27
Tableau 7 Coefficient de détermination entre les trois stations météorologiques et la reconstruction	42
Tableau 8 Récapitulatifs des années sèches de la reconstruction et leur classement dans les trois stations météorologiques.....	45
Tableau 9 Les caractéristiques des sites des chronologies de la croissance radiale : localisation géographique, l'altitude, le nombre d'arbre, la période de la chronologie et les espèces utilisées.	60

Tables des matières

LISTE DES ACRONYMES.....	4
INTRODUCTION	5
PARTIE 1 , ETAT DE L'ART.....	7
I. <i>La dendrochronologie.....</i>	7
a. Le signal dendrochronologique : un signal complexe.....	7
b. Un peu d'histoire	8
II. <i>La dendroclimatologie.....</i>	9
a. Les principes fondamentaux de la dendroclimatologie	9
b. La dendroclimatologie en Europe	11
PARTIE 2 , LE PROJET CERNES.....	12
PREAMBULE DU PROJET.....	12
I. <i>Le contexte géographique de l'étude.....</i>	13
Localisation géographique du massif du Vercors.....	13
Des influences climatiques diverses.....	14
Un contexte géologique spécifique	16
Une biodiversité importante.....	17
II. <i>Acquisition des données</i>	18
a. Le pin à crochets	18
Un axe nord-sud.....	18
Une formation géologique remarquable.....	19
Des prélèvements réalisés au niveau de la limite supra forestière	19
La sélection des vieux peuplements de pin à crochets	19
Un choix d'individu rigoureux	20
b. Les données climatiques.....	21
Les données HISTALP	21
Les données instrumentales de Météo France	22
APPROCHE DENDROCHRONOLOGIQUE.....	24
I. <i>Méthode de prélèvement des échantillons</i>	24
L'échantillonnage	24
La préparation des échantillons.....	25
II. <i>Le comptage des cernes et création d'une chronologie de référence</i>	26
Le pointage des cernes sur Coorecorder.....	26
L'interdatation au moyen du logiciel CDendro.....	26
APPROCHE DENDROCLIMATOLOGIE.....	29
I. <i>L'identification des années caractéristiques au moyen de la routine Pointer.R.....</i>	29
II. <i>Standardisation des données.....</i>	30
III. <i>Relation cerne/climat</i>	31
La fonction de réponse.....	31
La fonction de réponse mobile	31
IV. <i>Les paramètres utiles pour la reconstruction climatique</i>	32
Les écarts à la moyenne des précipitations des données HISTALP	32

La reconstruction climatique	32
PARTIE 3 LES RESULTATS ET LA DISCUSSION	34
RESULTATS	34
I. <i>Les données météorologiques</i>	34
Une corrélation entre les trois séries climatiques	34
II. <i>La création de la chronologie de référence du massif du Vercors</i>	34
Un signal commun entre les placettes	34
La chronologie de la grande placette	35
III. <i>Le comportement inter et intra-annuelle du pin à crochets</i>	37
Les années caractéristiques depuis les années 1880	37
Les réponses mensuelles du <i>Pinus uncinata</i> Mill. face aux précipitations et aux températures	38
Les fonctions de réponse mobile	38
IV. <i>La reconstruction des paramètres de précipitation</i>	40
La reconstruction des précipitations	40
Identification des années de sécheresses et des années pluvieuses	42
DISCUSSION	46
La première reconstruction des précipitations estivales à l'échelle du Massif du Vercors et des Alpes	46
Avant 1880... ..	46
... Après 1980	48
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	50
Rappel des objectifs et méthodes utilisées pour y parvenir	50
Les influences du climat sur la croissance du <i>Pinus uncinata</i> Mill.	50
Modélisation des écarts à la moyenne des précipitations de juin et juillet	50
Le facteur limitant ou les facteurs limitants du <i>Pinus uncinata</i> Mill.	51
Hypothèse d'évolution de la forêt de pin à crochets dans le massif du Vercors	51
BIBLIOGRAPHIE	52
TABLES DES ILLUSTRATIONS	55
TABLES DES TABLEAUX	56
TABLES DES MATIERES	57
ANNEXES	59
Annexe 1 : Chronologie de références présentes dans les Alpes Européenne (Corona et al., 2010)	59
Annexe 2 : Structures géologiques du massif du Vercors (SIG PNRV)	61

Annexes

Annexe 1 : Chronologie de références présentes dans les Alpes Européenne (Corona et al., 2010)

	Latitude	Longitude	Altitude	Nombre d'arbre	Période	Essence
1	44°36	7°04	2200	12	1426-1997	Larix decidua Mill.
2	46°17	9°51	2200	16	1563-1992	Larix decidua Mill.
3	47°24	13°01	1725	27	1380-1947	Larix decidua Mill.
4	46°34	12°15	2000	17	1463-1998	Larix decidua Mill.
5	45°12	6°40	2100	26	1353-1973	Larix decidua Mill.
6	45°01	6°32	2180	18	1492-1989	Larix decidua Mill.
7	44°51	6°25	2150	14	1557-1995	Larix decidua Mill.
8	46°20	10°39	2200	17	1438-1999	Larix decidua Mill.
9	46°22	12°03	1970	69	1520-1990	Larix decidua Mill.
10	44°42	6°29	2150	21	1474-1992	Larix decidua Mill.
11	44°02	7°26	2200	28	988-1974	Larix decidua Mill.
12	44°17	6°50	2100	34	1414-1995	Larix decidua Mill.
13	46°36	10°26	/	17	1295-1905	Larix decidua Mill.
14	45°01	6°34	2000	88	751-1894	Larix decidua Mill.
15	46°31	11°01	/	35	1333-1974	Larix decidua Mill.
16	44°47	6°35	2180	19	1381-1989	Larix decidua Mill.
17	46°10	10°34	2050	15	1468-1999	Larix decidua Mill.
18	44°06	6°39	2100	8	1421-1992	Larix decidua Mill.
19	46°18	9°46	2050	21	1007-1993	Larix decidua Mill.
20	46°-47°	7°29-11°03	1900-2200	composite	951-2002	Larix decidua Mill.
20a	46°25	7°29	/	330	1085-2002	Larix decidua Mill.
20b	46°12	8°03	/	78	685-2003	Larix decidua Mill.
20c	46°27	9°46	/	376	800-1993	Larix decidua Mill.
20d	46°25	8°10	/	326	505-2003	Larix decidua Mill.
20e	47°00	11°03	/	417	645-1997	Pinus cembra. L
21	46°12-47°	7°29-11°03	1900-2200	composite	755-2004	Larix decidua Mill.
21a	46°50	8°01	/	31	1681-1986	Larix decidua Mill.
21b	46°25	6°24	/			Larix decidua Mill.
21c	46°25	7°29	/	110	1258-2004	Larix decidua Mill.
21d	46°12	8°03	/	39	735-1510	Larix decidua Mill.
22	44°36	7°04	2225	23	1453-1994	Pinus cembra. L
23	46°06	12°07	2100	56	1425-1997	Pinus cembra. L
24	44°49	6°40	2000	26	1475-1998	Pinus cembra. L
25	45°00	6°34	2100	39	1594-2000	Pinus cembra. L
26	45°31	7°07	1820	25	1478-1994	Pinus cembra. L
27	44°55	6°40	2200	24	1472-1995	Pinus cembra. L

28	46°22	12°03	1970	93	1474-1990	<i>Pinus cembra</i> . L
29	46°29	12°04	2100	13	1493-1995	<i>Pinus cembra</i> . L
30	44°10	7°09	2100	18	1637-2000	<i>Pinus cembra</i> . L
31	44°39	6°47	2270	23	1575-1998	<i>Pinus cembra</i> . L
32	45°42	6°57	2200	17	1472-1997	<i>Pinus cembra</i> . L
33	44°22	6°28	2300	11	1564-2000	<i>Pinus cembra</i> . L
34	46°10	11°26	2100	29	1488-1996	<i>Pinus cembra</i> . L
35	46°31	11°01	/	24	1544-1971	<i>Pinus cembra</i> . L
36	44°07	7°13	2100	16	1540-2000	<i>Pinus cembra</i> . L
37	46°02	10°32	2100	14	1584-1996	<i>Pinus cembra</i> . L
38	44°22	6°30	2350	12	1551-2000	<i>Pinus cembra</i> . L

Tableau 9 Les caractéristiques des sites des chronologies de la croissance radiale : localisation géographique, l'altitude, le nombre d'arbre, la période de la chronologie et les espèces utilisées.

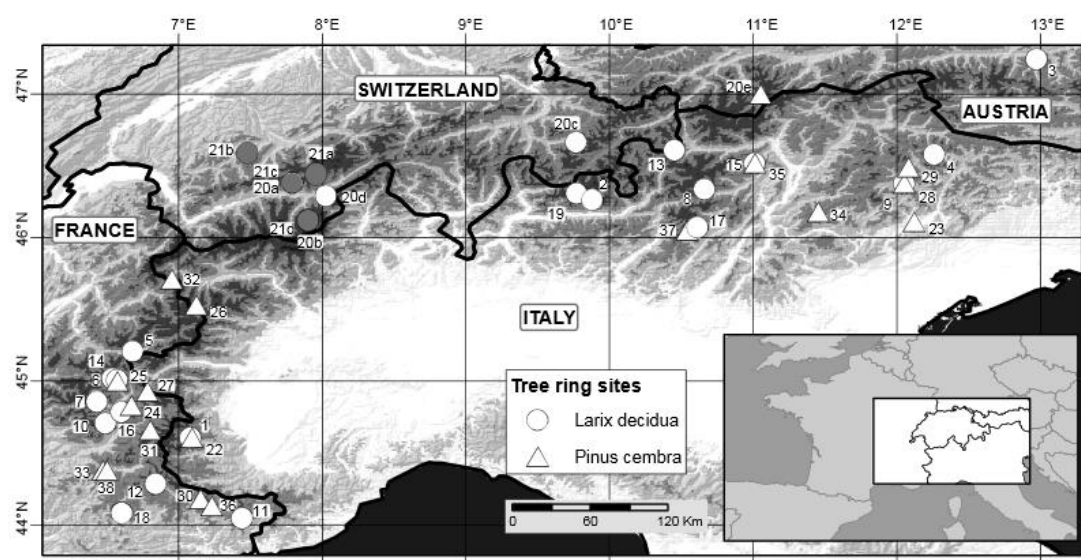


Figure 35 Localisation des 38 chronologies de cernes de croissance dans les Alpes Européennes pour le *Pinus cembra* et le *Larix decidua* (Corona et al., 2010)

Annexe 2 : Structures géologiques du massif du Vercors (SIG PNRV)

